المكان والزمان في العالم الكوني الحديث

تأليف

ب. ك. و. دَيفيس

أستاذ الرياضيات التطبيقية

الكلية الملكية

لندن

ترجمة

د. أذهَمُ السَّمَّان

أستاذ الفيزياء في كلية العلوم

جامعة دمشق



مؤسسة الرسالة

حسن أبو يوسف الكويتي

المكان والزمان
في العالم الكوني الحديث

تأليف

ب.ك.و. ديفيس

أستاذ الرياضيات التطبيقية

الكلية الملكية

لندن

ترجمة

د. أذهم السمان

أستاذ الفيزياء في كلية العلوم

جامعة دمشق

دمشق

مؤسسة الرسالة

الطبعة الأولى

١٤٠٩هـ - ١٩٨٨م



مؤسسة الرسالة بيروت - شارع سوريا - بناية صمدي وصالحة
هاتف: ٣١٩٠٣٩ - ٢٤١٦٩٢ - ص.ب: ٧٤٦٠ برقيا: بيوشران

العنوان الأصلي للكتاب

Space and time in the modern universe

P. C. W. DAVIES
Lecturer in Applied Mathematics, King's College, London

الناشر :

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
CAMBRIDGE
LONDON · NEW YORK · MELBOURNE

بسم الله الرحمن الرحيم

المحتويات

تـدقـــيق

إن كلمة « مكان » مشتقة من « فعل الكون » . وهذا الفعل يتضمن ، فيما يتضمن من معـان وعنـدما يستعمل فعلاً تاماً على الأقل ، معنى الـ « وجود » في معظمه ومعنى الحدوث في باقيه . ووزن مَفعـل ، الـذي صيغت عليه كلمة مكان ، يبنى ليدل على « الحيِّز » أو « الوعاء » الذي يقع فيه الفعل . ففي هذا الإطار المحدد يمكن أن نقول إن كلمة « مكان » تعني « حيز الوجود أو الحدوث أو كليهما معاً » .

هذا من ناحية المعنى اللغوي الصرف . أما في اللغة الدارجة ، سواء كانت ملفوظة أو مكتوبة ، فان كلمة « مكان » النكرة غالباً ما تستعمل مضافة إلى اسم « شيء متجسد » يجعلهـا اسماً معرفاً بالاضافة ، كقولك « مكان الكتاب » . لكن فلاسفة العرب الأولين استعملوا اسم المعرفة « المكان » للدلالة على الحيز مجرداً عن الشيء الذي يحتله ويجسده وكمفهوم قائم بذاته مستقل عن محتواه . وقد أرادوا من اسم المعرفة هذا أن يصبح في اللغة العربية مقابلاً لكلمة spatium اللاتينية التي تعني ، في الأصل ، الامتداد اللامحدود الذي يحوي كل الامتدادات الجزئية المحدودة والتي اشتق منها الفرنسيون كلمة Espace والانكليز كلمة Space

أما المعنى الفيزيائي(*) لكلمة « المكان » فيكاد يكون مطابقاً لمدلول كلمة « الطول » أو « المسافة بين نقطتين » وهو مقدار تعود شتى عمليات قياس كمياته ، في أعماقها ، الى استعمال المسطرة ، سواء في الفيزياء التقليدية أو في الفيزياء الحديثة . أما بخصوص الجانب الفلسفي ، الذي يتبقى من مفهوم المكان بعد اقتطاع المدلول الفيزيائي منه ، فقد شاع ، لدى الصحافة والعامة خصوصاً ، استعمال كلمة « الفضاء » ، كقولهم « الفضاء الكوني » و « سفن الفضـاء » . ويميل أكثر العلميين العرب اليوم ، الفيزيائيون والرياضيون التطبيقيون منهم خصوصاً ، إلى استخدام كلمة الفضاء بدلاً من كلمة المكان حتى في المعنى الفلسفي المذكور أعلاه . وربما كانوا يهدفون من وراء ذلك ، عن وعي أو غير

(*) يقول العلميون عن مقدار ما إنه «فيزيائي» إذا أمكن صنع تركيب تجريبي يتيح قياس أية كمية منه وبالتعبير عنها بعدد حقيقي ولو تقريبي .

وعي ، إلى التخلص من الاختلاط الذي يمكن أن يجلبه المفهوم الشائع لكلمة مكان إلى مفهومها الفلسفي أو الفيزيائي .

أما نحن ، في نقل هذا الكتاب إلى اللغة العربية ، فلن نستخدم كلمة المكان إلا عندما نحكم أن المؤلف يقصد بها المعنى الفلسفي حصراً وفي المواضع التي لاتحتمل أي التباس ، وإلا فسنلجأ لاستخدام الاسم المركب « المكان = الفضاء » . أما في غير ذلك فسنستخدم كلمة الفضاء . ونذكر أيضاً أن كلمة المكان في الاسم المركب « المكان ـ الزمان » تشير إلى المدلول الفيزيائي والمدلول الفلسفي لهذه الكلمة على حد سواء . أما المدلول الشائع لكلمة مكان فسنستبدل به احدى الكلمتين : موضع أو موقع ، وربما مكان في حال عدم الالتباس .

هذا بخصوص المكان . أما بخصوص كلمة « الزمان » فلا بد ، في البدء ، ولاضير كبيراً من الاعتماد على مدلولها الشائع عند العامة المثقفة كمعنى فلسفي على الأقل . ذلك أن العلميين ، والفيزيائيين منهم خصوصاً ، يفضلون استعمال كلمة « الزمن » للتعبير عن المفهوم الفيزيائي . هذا ولئن أخفقت الفيزياء التقليدية بجميع وسائلها في صنع تركيب تجريبي (نسميه ميقاتية) موثوق لقياس الزمن ، كي يصبح مقداراً فيزيائياً بكل ما في هذه الصفة من معنى ، فإن نظرية النسبية قد جلبت الحل المثالي لهذه المعضلة . وشرح هذا الحل هو أحد أهداف هذا الكتاب .

« المترجم »

مقدمة

إن بنية المكان والزمان كامنة في أعمق أعماق علم الفيزياء وفي أساس خبرتنا المستمدة من الإدراك الحسي للعالم المحيط بنا . وهما مفهومان راسخان في تفكيرنا لدرجة أننا لانطرح ، في حياتنا اليومية ، أي سؤال حول خصائصهما . لكن العلم الحديث قد اكتشف أموراً يبدو فيها المكان والزمان قادرين على تغيير خصائصهما بدرجة من العنف تؤدي إلى ظهور حوادث غريبة غير متوقعة . إن العديد من هذه الأمور يدين بظهوره إلى التقدم الحديث في علم الفلك . فالمؤشرات على وجود الثقوب السوداء أو على الانفجار الأعظم الذي انبثق منه العالم الكوني قد حملت العلماء على أن يتحروا بالتفصيل سلوك المكان والزمان والمادة عندما تغدو الثقالة شديدة لدرجة أكثر من ساحقة . إذ يدل هذا التحري على أن المكان ـ الزمان يتلاشى لدرجة أن يفقد وجوده في بعض الظروف . إن انعكاسات هذه المكتشفات الحديثة على الطبيعة وعلى تطور الكون قد توغلت إلى أعماق الوجود .

يهدف هذا الكتاب إلى التمحيص في المكتشفات المثيرة ، والملغزة أحياناً ، بخصوص المكان والزمان والمادة كما يصورها رجال العلم في السنين الأخيرة . على أن الفهم الجيد لهذه الخطوات الجديدة يتوقف على استيعاب القارىء للنموذج الذي يقدمه الفيزيائيون المعاصرون عن بنية المكان ـ الزمان .

إن الفصول القادمة في هذا الكتاب تعرض بعناية سمات التغيرات التي طرأت على هذا النموذج خلال المئة وخمسين سنة الماضية وما رافق هذه التغيرات من تطور في نظرتنا إلى العالم الكوني . وإن القارىء سيكتشف كيف حدثت هذه التعديلات والتحويرات العديدة التي تناولت الصورة التي رسمها نيوتن للمكان ـ الزمان مستمداً إياها من الخبرة اليومية ، وذلك كي تنسجم الصورة الجديدة مع النظريات الفيزيائية الجديدة . فقوانين الكهرطيسية بأثيرها المزعوم الجهيض ، والمكان ـ الزمان الرباعي الأبعاد الغريب الذي جلبته نظرية النسبية الخاصة ، والمفهوم المحيِّر للفضاء المنحني في نظرية النسبية العامة ، ناهيك عن عجائب نظرية الكم التي تتنبأ بأن الثقوب السوداء التي يمكن أن تتبخر إلى لا شيء وبأن المكان ـ الزمان يمكن أن ينقسم إلى مكان وزمان في المجالات الأصغر من المجالات

المجهرية ، كل هذه الأمور تتطلب رؤية إدراكية جديدة لبنية كل ما ابتدعته الفيزياء من مفاهيم استمدت مدلولاتها من أكثر التجارب بدائية.

إن التماس الطريق في هذه الصورة المتغيرة لبنية المكان ـ الزمان له قصة مليئة بالمربكات والمفارقات تخص عدم التناظر بين ماضي العالم ومستقبله . إن طبيعة هذا اللاتناظر الزمني وأصله يكمنان في قوانين الترموديناميك الأساسية وفي الظروف التي فُرضت على العالم في بداياته الأولى . إن دراسة اللاتناظر الزمني تتيح لنا أن نختار بين نموذجين مختلفين للعالم : يتمثل أحدهما بالانزلاق نحو البرودة والعقم المستديم ويتمثل الآخر باستعادة شبابه ، باعتكاس الزمن أو بانمحاقه وخروجه من دائرة الوجود بكل بساطة .

إن كثيراً من جوانب هذا الموضوع تتشابك مع مجالات نشاط الفكر البشري الذي يتأثر عادة بالعقائد الدينية والميتافيزياء أكثر مما يلجأ إلى العلم الصارم . هذا رغم أن العلم يكاد يقدم اليوم أجوبة عن العديد من الأسئلة التي طالما حيرت كهان الدين والفلاسفة معاً . وعلى هذا الأساس ، ولمعالجة هذه التطورات بشكل كامل ، لابد من فحص موقع الجنس البشري والمجتمع الإنساني في العالم الحديث . فتأثير الأفكار المتغيرة ، عن المكان والزمان وطبيعة الكون ، كان ومايزال تأثيراً عميقاً في المجتمع البشري . وعلى هذا فالثورة العلمية القائمة اليوم يمكن أن تؤثر تأثيراً مستديماً على نظرة العقل البشري ، لا إلى العالم الكوني فحسب بل وإلى موقعنا في هذا العالم أيضاً .

لقد قصدت من هذا الكتاب أن يكون كتاب ثقافة ومتعة معاً ، لأنه يعرض خبرة الباحثين والأساتذة فيما يعالج من مواضيع . وحل الألغاز العلمية لعالمنا مهمة من أنبل المهام التي يستمتع بها الفكر البشري . وقد حاولت أن أنقل للقارىء شعور الحماس والروعة الذي ينتاب من يمارسون العلم الحديث في هذه الأزمنة المفعمة بالتحديات .

كما أنني لم أفترض لدى القارىء سوية عالية من الخبرة . فالقارىء العادي ذو الميول العلمية والذي يملك ، دون الرياضيات ، معلومات أولية في الفيزياء لن يجد صعوبة كبيرة في فهم كثير من المناقشات . وعلى كل حال ، وبسبب أن بعض المواضيع متقدمة جداً ، فإن طلاب الفيزياء والفلك والرياضيات التطبيقية والفلسفة سيجدون ثروة من المعلومات وثيقة الصلة بدروسهم أو بأبحاثهم .

وأخيراً أود أن أشكر زملائي في الكلية الملكية في لندن ، ممن كان لآرائهم وملاحظاتهم فضل كبير في إبراز وجهة نظري الخاصة في فيزياء المكان ـ الزمان وفي علم الكونيات .

ملاحظة على الرموز العددية . يتعامل الفيزيائيون والفلكيون كثيراً مع أعداد كبيرة جداً أو صغيرة جداً ، ومن غير الملائم أن تكتب بتمامها . ولهذا السبب فإنهم غالباً مايلجؤون إلى استعمال الصيغة المختزلة لـ « قوى العشرة » كما فعلنا في هذا الكتاب . فبهذه الطريقة يتمثل العدد المؤلف من واحد متبوع بكمية من الأصفار عددها ن بالرمز البسيط $١٠^{ن}$. فالألف يتمثل بـ $١٠^{٣}$ ، والمليون بـ $١٠^{٦}$ والمليار بـ $١٠^{٩}$. أما الأعداد الصغيرة فتتمثل باستعمال قوى سالبة ($١٠^{-ن}$) . فالواحد من الألف يتمثل بـ $١٠^{-٣}$ ، والواحد من المليون بـ $١٠^{-٦}$ ، والواحد من المليار بـ $١٠^{-٩}$

الكلية الملكية ، لندن ب . ك . و . ديفيس

١ الجوانب العديدة للمكان والزمان

١ ـ ١ المفاهيم العامة

إن كلمتي فضاء (التي سنستخدمها غالباً كمرادف لكلمة مكان) وزمان قد اكتسبتا ، لدى الاستعمال الشائع في اللغة العربية ، معاني عديدة قد تحيطهما ببعض الغموض . ففي اللغة الدارجة ، كثيراً مايفهم من كلمة فضاء الخلو أو الامتداد أو الحيِّز ـ الوعاء الذي تحتله حجوم الأشياء المتجسدة . وقد اكتسبت في لغة اليوم معنى « الفضاء الخارجي » ، أي المنطقة التي تقع خارج الكرة الأرضية والتي يتصورها الناس خلاءً تاماً . لكن الفجوات العظيمة التي تفصل فيها بين الأجرام السماوية تحوي على الدوام ، وعلى الأقل ، كمية ضئيلة من المادة وكمية هائلة من الاشعاعات من شتى الأجناس . ومع ذلك فإن كلمة فضاء ترسم في الذهن صورة الخلو ، أي مايتبقى بعد نزع كل الأشياء الملموسة . وعلى هذا فإن أغلب الناس يفكرون بالفضاء وكأنه وعاء يحتوي العالم الكوني ـ كل المجرات والنجوم والكواكب ـ أو حلبة لما يحدث فيه . وهو كائن لا يزول بوجود الأجسام التي تحتله ، بل « يمتلىء بها »(*)

إن هذه النظرة إلى الفضاء ، التي ترى فيه الخلو من الأشياء ، يجعل من الصعب على كثير من الناس أن يفهموا لماذا يريد العلميون بناء نظرية بخصوصه . فالفضاء هو ، في نهاية الأمر ، لا شيء ، ولا شيء إذن يقال فيه .

لكن نظرة العلميين للفضاء تختلف تماماً عن ماذُكر . فأولاً ، ولتبديد كل سوء تفاهم ممكن ، نقول إن النظريات العلمية في موضوع الفضاء ليست نظريات تهتم بالفضاء الخارجي . فخواص الفضاء خارج الأرض تبقى تقريباً في كل مكان مماثلة تماماً لخواص الفضاء عند سطح الأرض . فعندما تكهن نيوتن Newton ولايبنيتز Leibniz بخصوص طبيعة المكان = الفضاء لم يكونا يعلمان عن علم الفلك الحديث إلا القليل .

(★) لقد أجرينا تعديلاً طفيفاً على النص الانكليزي لهذا المقطع بما ينسجم مع اللغة العربية . (المترجم)

إن العلميين المعاصرين يعتبرون أن الفضاء ذو سويات بنوية عديدة . فبعض فروع الفيزياء الحديثة توحي فعلاً بأن الأشياء المادية ليست في الحقيقة سوى اضطراب في هذه البنية المستترة . فبدلاً من تصوير العالم الكوني كشيء محتوى في الفضاء يرى علم الفلك الحديث بالأحرى أن الأشياء المادية والفضاء ، كليهما معاً ، تؤلف العالم الكوني . فهذا العالم هو إذن فضاء ومادة .

فالفضاء يقف إذن على قدم المساواة مع المادة في امتلاك كيان فيزيائي وخصائص فيزيائية وبنية فيزيائية . وإن جانباً كبيراً من هذه البنية كان مألوفاً لدى قدماء الإغريق الذين ضمّنوه في بناء مقولاتهم ونظرياتهم في علم الهندسة . وبعدهم بزمن طويل اكتشف نيوتن (١٦٤٢ - ١٧٢٧) للفضاء خواص جديدة من خلال دارسة حركة الأجسام المتحركة في الفضاء ، أسبابها ومقوّماتها . كان نيوتن ينظر إلى الفضاء وكأنه هيولة يمكن أن تفعل في الأجسام المادية فعلاً تحريكياً .

وفي مقابل صورة الفضاء هذه ، ككيان فيزيائي يمكن أن يوجد بمحض ذاته مستقلاً عن المادة ، يوجد تقليد شائع منذ القديم لدى بعض العلميين والفلاسفة يتجلى في محاولة ردّ كل خواص الفضاء إلى علائق تقوم فيما بين الأجسام المادية . وحجة أصحاب هذه المدرسة الفكرية العلائقية تستند إلى واقع أن استقاء المعلومات عن الفضاء يتم بالقياسات والأرصاد التي تتناول الأجسام المادية والإشارات الضوئية وما إلى ذلك . أي أن المفكر العلائقي يرى كلمة فضاء وكأنها تخلص لغوي يشكل وسيلة للتعبير عن هذه العلائق . فالعلائق المكانية فيما بين الأجسام المادية لا تتطلب ، في وجهة نظر هذا المذهب ، هيولة فيزيائية خاصة ، اسمها « الفضاء » ، بأكثر مما تتطلب العلاقة بين الإنكليز هيولة فيزيائية خاصة اسمها « الانتماء » (إلى وطن واحد) . وفي الفصول الأخيرة سنناقش إلى أين صارت المدرسة العلائقية مع تطور الفيزياء خلال القرون الثلاثة الماضية .

إن كثيراً من الخواص الممنوحة للفضاء (أو للعلائق فيما بين الأجسام) معروفة لدى أغلب الناس ومتفق عليها عموماً . على أن هناك خواص أخرى أكثر رهافة بكثير ولا يعرفها إلا الفيزيائيون أو الرياضيون . إن تنوع هذه البنية وغناها قد تجليا مؤخراً عندما تمت المقارنة بين خواص الفضاء الفيزيائي الواقعي وبين النماذج الرياضية للفضاءات التي تخلو من

بعض الجوانب البنوية . وسنشرح في الفصل التالي الأوصاف الرياضية الحديثة للفضاء الفيزيائي ، لأن تقدير الطبيعة المعقدة للفضاء الواقعي يعود إلى كثرة المفاهيم الرياضية التي يجب استخدامها في شرح تلك الأوصاف بشكل سديد . وقبل أن نناقش هذه النماذج الرياضية لا بد من عرض بعض الأفكار بخصوص استعمال كلمة الزمن .

إن خبرة الانسان بالزمن تختلف جوهرياً عن خبرته بالفضاء . فالزمن ، بمعنى ما ، هو أكثر مظاهر الخبرة بداتية . إنه يدخل في وعينا مباشرة ويعم إحساساتنا ومواقفنا وتعابيرنا . وبخلاف الفضاء الذي نستشف بنيته فقط بالملاحظة والتجريد التام عن المألوف ، فإن الزمن يدخل في إداركنا متمتعاً ببنية ذات سوية جد عميقة . فاكتساب المعلومات عن الفضاء يتم عبر المخبر والاحساسات الخارجية . أما اكتساب المعلومات عن الزمن فله «باب خلفي» إضافي في أذهاننا . فبنية الزمن التي نحس بها من خلال هذا الباب الخلفي يمكن أن تتمثل بسيل دافق ، بمرور من الماضي الى المستقبل يخترق تجربتنا الواعية عبر لحظات الحاضر واحدة بعد أخرى . فالفضاء ، في الذهن البشري ، خال بينما الزمان مليء بالنشاط .

إن صورة الزمن العلمية تختلف هي الأخرى جذرياً عما ذكر . وقد لايبدو واضحاً تماماً أن نضطر لدمج الزمان والمكان معاً بأية طريقة أساسية ، لأنهما يختلفان كلياً في مجال الخبرة البشرية . لكن الأوصاف الرياضية للزمان تتجلى مشابهة جداً لأوصاف الفضاء ، وهما ، فوق ذلك ، يمتزجان معاً بوساطة الحركة . ويتضح من دراسة حركة الأجسام المادية والاشارات الضوئية أن المكان والزمان هما بالفعل مظهران لبنية مفردة واحدة تسمى « المكان ـ الزمان » .

إنه للغز محير من أكبر الألغاز في الفيزياء أن تغيب الخبرة البدائية الواعية للزمان ـ سيل اللحظات الحاضرة أو حركتها ـ عن توصيف الفيزيائيين الموضوعي للعالم . ولهذه الظاهرة سببان متساويان في الأهمية ، أحدهما ناجم عن نقص في هيكل البناء الفيزيائي الذي لايبدي سوى اهتمام محدود بدور الذهن الواعي في استكشاف العالم ، والآخر ناجم عن أن مرور الزمن وهم لا يمكن إيضاحه بأية وسيلة . وفوق ذلك كله ، وبسبب معرفتنا العميقة هذه بالزمن ، فان الهزات العنيفة التي سببتها النظريات الحديثة ، كنظرية النسبية ، لهي

أشد وقعاً على الصورة الحدسية للزمان من مثيلاتها التي زعزعت صورة المكان . وقد نجم عن ذلـك نتائج ومفارقات فلسفية تكتسح التكهنات الدنيوية وتتقاطع مع قضايا أخرى كحرية الاختيار والموت . هذا وإن التفاعل بين العالَم الفيزيائي الذي يعيشه رجل العلم وبين العالَم الميتافيزيائي القابع في أذهاننا يقود الى صراع مرير غير مألوف .

١ ـ ٢ نماذج الفضاء الرياضية .

إن أية نظرية بخصوص الفضاء ، ككل النظريات العلمية ، تحتاج الى نموذج . وهذه النظرية ، على شاكلة أكثر النماذج الفيزيائية الجيدة ، تتطلب توصيفاً رياضياً . ولكي نصنـع نمـوذجاً ذا شبه جيد بالفضاء في عالم الواقع ، لا بد من استخدام عدد كبير من المفاهيم الرياضية . ولكن ليطمئن القارىء ، فنحن لن نحتاج ، في سبيل إفهامه ما سيرد في هذا الكتاب ، إلا للأوصاف البدائية لهذه المفاهيم . وإن إدراكها سيكشف له نوعية طبيعة فضائنا الحقيقية .

يستخدم الرياضيون كلمة فضاء للدلالة بها على مجموعة من النقاط . والنقطة هي الغرض الأولي الذي يتناوله التوصيف الرياضي لنماذج الفضاء ، ويمكن أن نصورها بأنها النهاية التي تنتهي إليها الدائرة عندما يتقلص نصف قطرها الى الصفر . فليس للنقطة إذن حجم ولا امتداد ولا منطقة داخلية . والبنية المفروضة على الفضاء تتناول مجموعة النقاط ، لا النقاط نفسها كأفراد مستقلة .

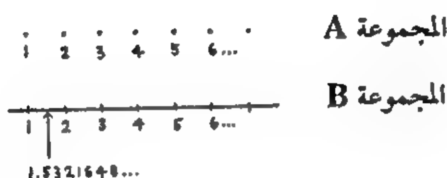
يجب الإلحاح على أن اي نموذج رياضي للفضاء يمكن أن يفيد في أمور متنوعة . فيمكن استخـدامـه في توصيف أو حل أنـواع عديدة من مسـائل لا تنتمي الى مجالات رياضية ، أو لأهميته الذاتية وحدها . ويوجد نماذج فضاء رياضية تجريدية تفيد في الحياة اليومية ، كرسم المخططات البيانية . فصفيحة الورق التي رُسم عليها المخطط هي مجموعة نقاط ، والمخطط نفسه هو مجموعة نقاط محتواة في الأولى وتشير إلى نوع من العلاقة ، كتغير ميزان المدفوعات الوطني بمرور الزمن . والفضاء الرياضي يمكن أيضاً أن يفيد كنموذج للفضاء الفيزيائي الحقيقي . ومن الواضح أن الفضاء الحقيقي هو أكثر من مجموعة نقاط

فيه . ولابد من التعمق تدريجياً في فرض سويات متزايدة التعقيد من التوصيف البنوي لهذه المجموعة قبل أن تبرز لنا الخواص المألوفة للفضاء الحقيقي ، وربما نحتاج الى فرض بنية أعمق من ذلك كي نعطي وصفاً صادقاً لبعض الخواص الغريبة التي كشفت عنها الفيزياء الحديثة .

سنعمد في هذا الفصل الى جدولة ومناقشة موجزة لشتى سويات الأوصاف الدقيقة التي يجب أن نفرضها على مجموعة النقاط كي نتوصل الى نموذج مقبول للفضاء الحقيقي . هذا وإن سمات الفضاء الحقيقي التي يجب أن يحاكيها النموذج تتوقف ، دون شك ، على نظرية الفضاء الموضوعة قيد المناقشة . ومع ذلك يوجد سمات أساسية يجب أن تشترك فيها كل النظريات ، وهي السمات التي سنشرحها الآن .

(ا) الاستمرارية continuity يفترض عموماً أن أي مجال من الفضاء يمكن أن يتقسم الى أجزاء أصغر فأصغر بقدر ما نريد ودون أن يحد شيء من استمرار هذه العملية . إن هذا الافتراض هو مجرد عقيدة وايمان ، لأنه لم تثبت حتى اليوم إمكانية أن نعرف بالضبط مايحدث ضمن مسافة أصغر من ١٠-١٣ سم (سنتيمتر) . ومع ذلك فإن فرضية الانقسامية اللامتناهية ما تزال مقبولة لدى الجميع تقريباً ، مما يبيح لنا أن نعتبر الفضاء مجموعة لا متناهية العدد من النقاط المرتصة جنباً الى جنب لتتوالى مستمرة دون انقطاع . ليس لهذا الوصف ، بالضرورة ، سوى قيمة نفعية في البحث ، لأن الاستمرارية مفهوم جد معقد لم يتمكن الرياضيون من فهمه إلا في خلال القرن الماضي وما بعده . ومع ذلك يبدو من الطبيعي أن يحوي الخط المستمر ، بمعنى ما ، عدداً من النقاط أكبر مما يحويه صف من النقاط المنفصلة (كما نرى في الشكل ١ ـ ١) رغم أن كلا العددين لا متناه في الكبر . وهذا الفرق يتمثل غالباً بأن صف المجموعة A يتميز بإمكانية مقابلة الأعداد الصحيحة : 1 ، 2 ، 3 ، . . . ، بعناصر المجموعة ؛ لكن نقاط الخط المستقيم تستعصي على هذه العملية ؛ فهي تتطلب كل الأعداد الواقعة فيما بين الأعداد الصحيحة (كالعدد ....1,6321648) كي نقوم بعملية مقابلة كاملة شاملة . وبين وقت وآخر يساق مثل هذا الفضاء الشبكي A المرسوم في الشكل ١ ـ ١ كاقتراح لنموذج يمثل الفضاء الحقيقي . لكننا لن نسهب في الكلام عن خواص مثل

شكل ١ ـ ١ . فكرة الاستمرار . المجموعة A ، عندما تمتد دون حدود نحو اليمين (أو اليسار) تحوي عدداً لا متناهياً من النقاط يمكن أن نلصق بها سلسلة الاعداد الصحيحية 3,2,1 ، . . . المجموعة B ، القطعة المستقيمة ، تضم أيضاً عدداً لا متناهياً من النقاط ، حتى عندما يكون طول القطعة محدوداً ، لكن هذه النقاط مرتصة بشدة لاتدع مجالاً لأية فجوة في صفها ، فالخط مستمر . وليس الفرق بين المجموعتين مجرد فرق في السلّم . إذ لايوجد مايكفي من الاعداد الصحيحة لاجراء تقابل كامل بينها وبين كل نقاط الخط . فالمجموعة تضم فعلاً نقاطاً أكثر عدداً مما تحويه المجموعة A



هذه النماذج اللا معتمدة .

فلكل نقطة في الفضاء المستمر (أو في المتّصِل ، كما نسميه أحياناً) جوار يضم ، مهما كان صغيراً ، عدداً لا متناهياً من نقاط أخرى . وبالاضافة لذلك يجب علينا أن نفترض ، حول نقطتين مختلفتين ، إمكانية صنع جوارين منفصلين (أي غير متداخلين) .

(ب) ـ الأبعاد dimensionality . هناك سمة نوعية للفضاء الحقيقي لابد أن تُفرض على هذا المتصل ، ألا وهي واقع أنه ذو ثلاثة أبعاد . وأسهل وسيلة لفهم معنى هذه الصفة هي أن ننطلق من حالة نقطة واحدة ، وأن نمنحها بالتعريف البعد صفر . ويمكن بعدئذ استعمال نقاط لتشكيل خط الحدود لفضاء وحيد البعد . لنتأمل مثلاً في خط مستقيم محدود . إن حدود هذا الخط هما نقطتا طرفيه . والخط (الوحيد البعد) يمكن أن يُستخدم بدوره لتشكيل حدود فضاء ذي بعدين . فمحيط الدائرة ، وهو وحيد البعد ، يحد قرصاً ذا بعدين . وكذلك يمكن لفضاء ذي بعدين (سطح) أن يستخدم لتشكيل حدود فضاء ذي ثلاثة أبعاد ، وهكذا دواليك . ولايوجد ، رياضياً ، حد أعلى للأبعاد التي يمكن أن

يمتلكها فضاء ما . والواقع أن فرعاً هاماً من الرياضيات ذات التطبيقات الفيزيائية يتعامل مع فضاء ذي عدد لا متناه من الأبعاد ! وليس من المعروف سبب كون الفضاء الحقيقي ذا ثلاثة أبعاد . ومن المفيد أن نبحث في خواص العوالم التي يسمى فضاؤها ثنائي البعد أو سداسيه . إذ نصادف أحياناً أشياء ، كانتشار الموجة والظواهر الكهربائية ، تبدو بشكل مختلف جداً في هذه العوالم الخيالية .

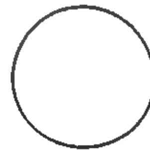
(ج) ـ التواصل connectivity . لا نرى سبباً يحتّم على الفضاء الحقيقي أن لا يكون مؤلفاً من عدد من القطع المتفاصلة . لكننا على كل حال لم نستطع أن نتعرف على

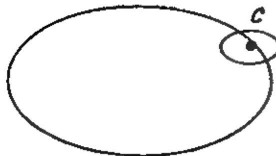
شكل ١ ـ ٢ . الحدود والأبعاد . الخط المستقيم فضاء وحيد البعد محدود بنقطتين A و B . إن أي جوار لهاتين النقطتين [ممثل بـ ( )] ، مهما كان صغيراً ، يحوي دوماً عدداً لا متناهياً من النقاط تنتمي للفضاء أو لا تنتمي له . لكن محيط الدائرة فضاء وحيد البعد ليس ذا حدود ، ذلك أن أياً من نقاطه لا تتمتع بالخاصة المذكورة أعلاه .

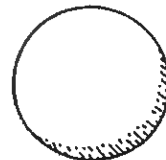
فكما تشكل النقطتان A و B حدوداً للخط المستقيم تشكل الدائرة حدوداً للقرص ذي البعدين (لقد أشرنا على الرسم الى نقطة حدودية C وجوارها) . وبالمقابل نرى أن سطح الكرة فضاء ليس ذا حدود . انه فضاء ذو بعدين غير محدود .

يمكن تعميم الاعتبارات على أي عدد من الأبعاد





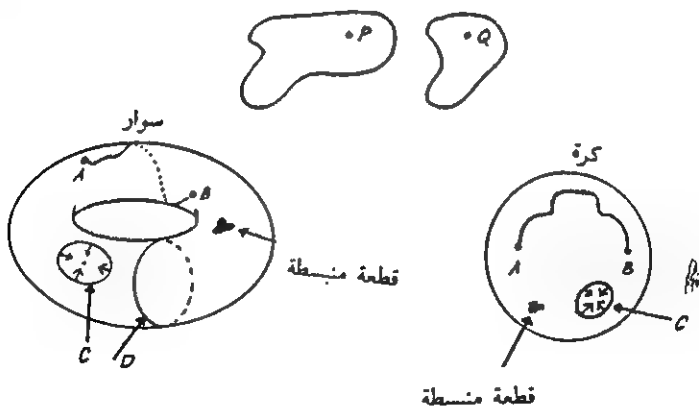




منطقة من الفضاء منفصلة عن فضائنا ، وعلى ذلك فإننا لن نهتم بهذا الأمر . ومع ذلك فإن أي فضاء مفرد يمكن أن يتواصل بعدة أساليب مختلفة . فسطح السوار (شكل الكعكة) وسطح الكرة ، مثلاً ، (شكل ١ ـ ٣) هما فضاءان متواصلان بمعنى أن كل نقطة من الفضاء الواحد يمكن أن توصل بأية نقطة أخرى من الفضاء نفسه بوساطة خط مستمر تقع

شكل ١ ـ ٣ . فضاءات ، متفاصلة ومتواصلة ، ذات بعدين . إن النقطتين P و Q في الفضاء المرسوم في أعلى الشكل لايمكن أن تتواصلا بواسطة خط مستمر يبقى بتمامه ضمن الفضاء . فهذا الفضاء متفاصل . وبالمقابل نرى أن كل مناطق سطح السوار ، وكذلك مناطق سطح الكرة ، متواصلة ، ولكن بأسلوبين مختلفين . فعلى سطح الكرة يمكن للدائرة التي مثل C أن تنكمش حتى تغدو نقطة . أما على سطح السوار فإن هذا لايمكن أن يحدث إلا للدائرة C ، لا للدائرة D . فيقال عن سطح الكرة إنه بسيط التواصل ، وعن سطح السوار انه عديد التواصل .

إن الكائن المسطح القاطن في فضاء متواصل يستطيع أن يستنتج الفرق بين أسلوبي التواصل بواسطة أرصاد يقوم بها ضمن الفضاء ذي البعدين وحده . أي أن هذا الكائن لايحتاج الى مغادرة السطح ولا الى رؤية (كما ندرك نحن) أن الكرة ، أو السوار ، محتويان في فضاء ذي ثلاثة أبعاد كي يعرف إذا كان الفضاء وحيد التواصل أو عديده ، وذا حدود أو عديم الحدود . إن مثل هذه الملاحظات يمكن أن تنطبق على عالمنا الخاص ذي الأبعاد الثلاثة .



كل نقـاطـه في الفضاء نفسه . لكن هذين الفضائين (سطحا الكرة والسوار) متواصلان بأسلوبـين مختلفـين . نعبر عن أحدهما بأن المنحني المغلق (كمحيط الدائرة) المحتوى في السطح يمكن أن يتقلص باستمرار حتى يصير إلى نقطة من سطح الكرة ، لكن هذا ليس بالضرورة ممكناً على سطح السوار . إننا لا نعلم فيما إذا كان عالمنا الكوني من نوع سطح الكرة أم من نوع سطح السوار ، أم من نوع آخر أشد تعقيداً . لكنه ، على كل حال وفي المنطقة التي نلاحظها فعلاً ، فضاء بسيط التواصل ، أي كسطح الكرة .

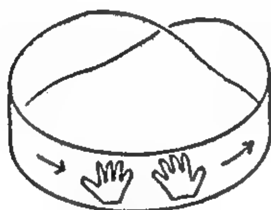
وعنـد هذه المرحلة قد يحار القارىء إزاء هذا «التخريف» ويتساءل عن مغزى أن نناقش اذا كان فضاؤنا المألوف يشبه السوار ، أو إذا كان مؤلفاً من قطع متفاصلة . إذ لو كان الأمـر كذلك ، فماذا يمكن أن يوجد «خارج» الفضاء ، وماذا يملأ الثقب في وسط السوار ، الخ ؟ إن من المعقول أن نناقش الفضاءات الرياضية التي يمكن فيها للسطوح ذات البعدين أن تتكور وتلتف على نفسها لتصير كرة أو سواراً ، لكن من المؤكد أن هذا لايمكن أن يحدث إلا باحتواء (أي بتغليف) السوار ضمن فضاء حقيقي ذي ثلاثة أبعاد ! فما هو «الفضاء الأعظم» الذي يغلف فضائنا المألوف ؟ إن المسائل التي من هذا النوع تضع الفكر البشري ، غير الرياضي ، أمام عدد من المشاق الفكرية .

إن الفضاء يتعين ويُعرف بخواصه . وإن العديد من هذه الخواص يمكن أن تصاغ بدقة تامة تغنينا عن الاستناد الى أي فضاء مغلِّف للفضاء الذي نهتم به . فالكائن المسطح ذو البعدين يستطيع أن يستنتج أنه يقطن سطحاً سوارياً ، وذلك فقط بواسطة أرصاد تتم من هذا السطح وضمنه (لنقل بأن يتحرى فيما إذا كانت كل الدوائر يمكن أن تتقلص الى نقـطة) . فبواسطة الرياضيات لا توجد صعوبة في تعميم مناقشة السطح السواري ذي البعدين على حجم سواري ذي ثلاثة أبعاد وذلك بإدخال «فضاء أعظم» يغلفه . ومع ذلك فمن المفيد أحياناً أن نستعين بتصور فضاء مغلِّف ذي أبعاد أكثر عدداً ، وذلك فقط كوسيلة ارتياح حدسي ؛ لكن على المرء أن لاينتظر أي نقاش حول طبيعة هذا الفضاء المغلف ، لأنه ليس سوى فضاء مصطنع .

(د)الوجهة orientability . وبعد أخذ هذه الحيطة بعين الاعتبار سنلجأ مراراً إلى

شرح خواص الفضاء الحقيقي ذي الأبعاد الثلاثة بالتشبيه مع النماذج ذات البعدين المحتواة في الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة ، وذلك ابتغاء وضوح العرض . فمثل هذا التشبيه يساعد ، مثلاً ، في مناقشة خاصة هامة أخرى يُفترض عادة أن الفضاء الحقيقي يتمتع بها ، وهي الوجهة . فمن المعروف بالخبرة أن قفاز اليد اليسرى لا يمكن أن يصبح قفازاً لليد اليمنى مهما فعلنا به (شرط أن لا نقلب داخله خارجه) . وفوق ذلك ، من السهل أن نقبل أنه ، حتى لو ابعدناه الى منطقة بعيدة من العالم ثم أعدناه ، لن يغير وجهته ، أي أنه لن ينقلب من قفاز يساري إلى قفاز يميني . لكن الرياضيين كثيراً ما يصادفون فضاءات يمكن أن يحدث فيها هذا التغير الوجهوي . وكمثال على ذلك نسوق عصابة موبيوس Möbius (أوغست ، فلكي ورياضي ألماني ، ١٧٩٠ ـ ١٨٦٨) التي هي فضاء ذو بعدين نتمثله مصنوعاً ضمن فضاء ذي ثلاثة أبعاد كما في الشكل ١ ـ ٤ . انها عصابة ، من الورق مثلاً ،

شكل ١ ـ ٤ . فضاء غير موجة . إن لعصابة موبيوس خاصة غريبة تتمثل في أن القفاز اليساري يمكن أن يصبح قفازاً يمينياً عندما نجعله يقوم بدورة واحدة حول العصابة (لانستطيع أن نميز ، على هذه العصابة ، بين وجه وقفا) .



فُتلت مرة واحدة ثم لُصق طرفاها معاً فأصبحت ، كما يرى على الشكل ١ ـ ٤ بعد فحصه بتفكير بسيط ، قابلة لأن ينقلب فيها القفاز اليساري الى قفاز يميني بعد أن يقوم بدورة كاملة واحدة على العصابة (إنها فردة قفاز مسطح ، ذي بعدين ، لانميز فيه وجهاً عن قفا) . ويبت القصيد في هذا المثال هو أننا نستطيع أن نجد فضاءً ذا ثلاثة أبعاد يتصف

رياضياً بأنـه لايتقيد بهذا القيد . (فضاءً موبيوسياً ذا ثلاثة أبعاد) . إن عصابة موبيوس فضاء غير موجّه . هذا ولايوجد دليل واضح على أن عالمنا ليس فضاءً موجهاً .

إن هذه الخواص الأربع (من ا الى د) التي ناقشناها حتى الآن معروفة باسم السمات التوبولوجية . ودراستها هي غرض علم التوبولوجيا(*) . وهي لا تتعلق إلا باستمرارية الفضاء ولا علاقة لها بشيء آخر كالحجم والشكل الهندسي . وعلى هذا نرى أن الفضاء العادي لايُنظر إليه على أنه «مجموعة من النقاط» فحسب ، بل وبالأحرى على أنه يتمتع بخواص بنوية عديدة ، كالاستمرارية والأبعاد والتواصل والوجهة وخواص رياضية أخرى تخرج عن نطاق هذا الكتاب .

ولكن ، وحتى مع هذه القيود ، يمكن أن نصنع فضاءات رياضية ذات خواص تختلف جذرياً عن خواص الفضاء الحقيقي . وهناك قيود أخرى هامة يجب احترامها قبل أن نحصل على نماذج للفضاء الحقيقي مفيدة . ومن الواضح أن طريقة تعيين مواقع نقاط الفضاء بإحداثيات مستمرة هي واحدة من أهم الخواص العملية للفضاء . وكمثال شائع نعلم أن كل مدينة يمكن أن يتعين موقعها بخطي الطول والعرض ، وهما عددان يحددان ، كإحداثيين مستمرين ، مواقع النقاط على سطح الأرض ذي البعدين . ونستطيع أن نصنع جملة ثلاثة أعداد نعين بها موقع أي غرض في الفضاء ، كخط الطول وخط العرض والارتفاع عن سطح الأرض . وواضح أن القيم المعطاة لهذه الأعداد تتوقف على نوع جملة الإحداثيات المستخدمة . فنقل خط الصفر الطولي من غرينويتش الى باريس مثلاً يغير واحداً فقط من العددين اللذين يعينان موقع مدينة ما . ولكن لنفترض أننا اخترنا ، لتعيين موقع كل نقطة من سطح الأرض ، بُعدها واتجاهها بالنسبة لمكة بدلاً من خطي الطول والعرض . هذا وقد نحتاج أيضاً الى استخدام أكثر من جملة إحداثيات واحدة لتعيين كل نقاط الفضاء بدقة . فخطا الطول والعرض ، مثلاً ، عاجزان عن هذه المهمة عند القطبين (إن كل نقاط سطح الأرض تقع جنوب القطب الشمالي) . يجب إذن أن نوجد علاقة

(*) إن التوبولوجيا فرع من الرياضيات يهتم ، في الكائنات الهندسية، بدراسة خواصها التي تبقى قائمة رغم أي تشوه مستمر يطرأ وبصرف النظر عن مفهوم المسافة . (المترجم).

واضحة تسمح بالمرور من جملة إحداثيات الى أخرى في المناطق المشتركة في الجملتين . ونطلق اسم المناط manifold على الفضاء الذي يناط به احداثيات مستمرة متماسكة .

إن الفضاء الحقيقي ، بالاضافة إلى كونه مَناطاً ، يتمتع ببنية هندسية . فهو مثلاً يتضمن ، بين نقطتين منه ، مسافة صغرى . كما يمكن أن نعرِّف فيه مسافات وزوايا . ويقال عن الفضاءات التي تمتلك مثل هذه السمات إنها فضاءات مترية . ويوجد أنواع عديدة من الفضاءات المترية . وقبل عام ١٩١٥ كان يُفترض أن العالم الحقيقي فضاء متري مقصور على الإذعان للهندسة الاقليدية ، نسبة الى مؤسسها اليوناني إقليدس . ففي هذه المنظومة الهندسية يكون مجموع زوايا المثلث مساوياً ١٨٠ درجة ، ويمكن دوماً رسم مستقيمات متوازية . فهي بالضبط الهندسة الشائعة التي تعلمها القارىء في المدرسة دون صعوبة كبيرة . ولسوف نرى أن نظريات الفضاء الحديثة تكشف عن خاصة هامة هي أن البنية المترية يمكن أن تتغير من مكان الى مكان ومن زمان الى زمان ، وأن قواعد إقليدس لم تعد تنطبق عليها .

هذا وقبل أن نختم الكلام عن الخواص الرياضية للفضاء العادي ، لابد أن نقول كلمة عن الزمن وعن المكان ـ الزمان . من الواضح أن باستطاعتنا أن نفترض أن الزمن يمكن أن يشترك مع الفضاء بعدة خواص . فالخصائص التوبولوجية مثلاً ، كالاستمرار والتواصل والوجهة ، هي أيضاً من خواص الزمن رغم أنه ذو بعد واحد بدلاً من ثلاثة . وله أيضاً بنية مترية لأننا نستطيع أن نعرِّف المسافة الزمنية بين نقطتين زمنيتين على أنها الفترة التي تفصل بين حادثين (من الساعة الواحدة الى الساعة الثانية مثلاً) . ولهذه الأسباب يمكن أن ننظر الى الزمن على أنه فضاء متري رياضي وحيد البعد ، ولكن يجب أن لايفهم القارىء من هذا التعميم الرياضي أن الزمن هو بالفعل فضاء مقنَّع أو شيء من هذا القبيل . ولقد ثبت ، فوق ذلك ، أن من الأصح أن نعتبر الفضاء ذا الأبعاد الثلاثة والزمن ذا البعد الواحد فضاءً واحداً مكانياً ـ زمانياً ذا أربعة أبعاد ومترياً أيضاً . وعلى هذا الأساس فإن كلمة «فضاء» ستستعمل غالباً في هذه الظروف الرياضية كي تجمع معاً كلا المظهرين : الفضاء الفيزيائي والزمن ، أو المكان ـ الزمان .

١ ـ ٣ المكان والزمان عند نيوتن .

إن الخواص المترية للفضاء بالقرب من سطح الكرة الأرضية قد بُحثت بالتفصيل لدى مهندسي الاغريق في وقت مبكر ، وقد اكتسبت هذه السمات السكونية للعالم شكل نصوص في مسلمات الهندسة الاقليدية ونظرياتها . لكن الخواص الحركية للعالم لم تدخل في نظرية منهجية رياضية حتى جاءت أعمال إسحاق نيوتن في القرن السابع عشر . فقد قدم نيوتن نظرية في حركة الأجسام المادية . وبما أن الجسم المتحرك يسير خلال الفضاء في الزمن ، فإن هذه النظرية تربط المكان مع الزمان بروابط مجموعة من القوانين . أي أن نيوتن قد اكتشف علاقات رياضية بسيطة تتحكم في حركة الأجسام الصلبة المثالية . وهذا العمل العظيم طبع بطابعه الخاص بنية علم الفيزياء قروناً عديدة .

إن نموذج الفضاء الذي اقترحه نيوتن كان نموذج هيولة ، ذات وجود مستقل ، تتحرك فيها الأجسام والإشعاع ، على شاكله سمكة تسبح في الماء . فكان لكل جسم موضع وتوجه في الفضاء ، وكانت المسافة بين حادثين معرَّفة تعريفاً جيداً حتى ولو كان الحادثان يحدثان في زمنين مختلفين .

إن مفهوم الزمن عند نيوتن يرتبط ارتباطاً وثيقاً بفكرة التزامن . فالزمن في هذا النموذج شامل ومطلق . إن الزمن الشامل يعطي معنى لقولك إن الحادثين متزامنان (أي يحدثان في زمن واحد ، في لحظة واحدة) ـ وذلك حتى لو وقعا في نقطتين منفصلتين من الفضاء . فعلى هذا الأساس ، إذا كانت الساعة السابعة في لندن فإنها السابعة أيضاً في كل أنحاء العالم الكوني (رغم أن سكان نيويورك يسمونها الساعة الثالثة ، لكن هذا محض اصطلاح ، وهما وقت واحد في نظرية نيوتن) . فالمكان والزمان النيوتنيان مفترضان مطلقين دوماً ـ فهما مسرح سرمدي ، أو إطار لا يتأثر بسلوك محتوياته (الأجسام المادية) . رغم أن الفضاء ، عند نيوتن وكما سنرى ، مفروض أن يفعل في المادة ، في بعض الظروف ، دون أن تقوم المادة بأي رد فعل على الفضاء .

لكن معالجة نيوتن للفضاء ، على أنه هيولة مستقلة قائمة بذاتها ، جعل نظريته تدخل في صراع مع المدرسة العلائقية التي ترى في الكلام عن المكان والزمان محض

اصطلاح لغوي في الكلام عن العلائق فيما بين الأجسام المادية . فأنصار هذا المذهب يرون أن اعتبار الفضاء كياناً فيزيائياً لايزيد في معقوليته عن معقولية اعتبار «الجو الفاسد» بين شخصين متخاصمين مقداراً فيزيائياً حقيقياً . لأن القول عن شخص أنه منزعج من الجو الفاسد بعد الخصام ليس سوى تعبير لغوي عن مزاج المتخاصمين بعد الخصام . ولم يخطر لأحد أن يعتبر هذا (الجو) المزعوم كياناً قائماً بذاته مستقلاً عن وجود المتخاصمين ولا أن يفكر بإمكانية كشفه بجهاز ما . والفضاء ، كغرض فيزيائي ، لايكتسب معنى إلا إذا أمكن كشفه والشعور به ، أو إذا كان بإمكانه أن يولدّ تأثيرات فيزيائية . فكيف نعين نحن وضع جسم في الفضاء ؟ والفضاء ، بالتعريف ، غير ذي سمات ولا معالم . وبإمكاننا ، طبعاً ، أن نعين وضع جسم بالنسبة لمجموعة أجسام أخرى . فتحديد خطي العرض والطول ، مثلاً ، هو تحديد لبعد المكان عن خط الاستواء وعن خط طول غرينويتش على التوالي . وفوق ذلك ، فإن كل خواص الفضاء مستمدة حصراً من أرصاد تتناول الأجسام المادية والإشارات الضوئية . فيمكن مثلاً أن نتحقق ، بسهولة وبدرجة عالية من الدقة ، أن مجموع زوايا المثلث يساوي ١٨٠ درجة ، وذلك إذا تزودنا بآلات لقياس الزوايا وبأقطاب . فكيف يمكن أن نستنتج هذه الخاصة في الفضاء الخالي ؟ وفي كل الأحوال ، فإن كل جزء من البحر المحيط لا يختلف في منظره عن أي جزء آخر ، لكن وجوده كوحدة مادية منفصلة ليس موضع شك لأننا نستطيع أن نسافر خلال المحيط وأن نشعر بمقاومته . فهل حركة الجسم خلال الفضاء تولدّ آثاراً محسوسة ؟ هل يفعل الفضاء في الجسم المتحرك كما يفعل ماء البحر في السمكة المتحركة ؟

في نموذج المكان والزمان النيوتنيين يوجد معنى لمناقشة سرعة الجسم خلال الفضاء . إن السؤال «بأية سرعة أنت تتحرك ؟» يشكل جملة شائعة ذات معنى كاف لأن يجعل المرء يتوقع عموماً جواباً شافياً عنها . والرجل الجالس في غرفته يحسب عادة نفسه ساكناً . لكن قليلاً من التفكير يذكّره بأنه متحرك في واقع الأمر مع الأرض حول الشمس . فبأية سرعة تتحرك الأرض إذن ؟ لايمكن أن نعطي جواباً عن هذا السؤال دون أن نعرف سرعة حركة الشمس . فالواقع أن الشمس في حالة دوران حول المجرة . وليس هذا هو السؤال الأخير ، لأن كل المجرات المعروفة تتباعد بعضاً عن بعض ، على صورة توسع عام . فالعالم الكوني

يعج بالحركة . وهذه الاعتبارات تلقي ظلاً من الشك على كل وسيلة ميكانيكية نأمل بها أن نقرر فيها إذا كان شيء ، أي شيء ، في حالة سكون في الفضاء الكوني . فكيف نعرِّف إذن حالة السكون فيه ؟

كان يُعتقد خلال عدة قرون أن الأرض ساكنة في الفضاء ، وأن الشمس والقمر والنجوم تدور حول الأرض بتوقيت لا خلل فيه ، لكن الأرض نفسها ساكنة . بيد أن كوبرنيق (البولوني ، ١٤٧٣ ـ ١٥٤٣) حطم هذه الصورة المريحة التي تضع الجنس البشري في مركز العالم (وفي مركز اهتمام الله) وذلك بالبرهان على أن الشمس تقع في مركز المنظومة الشمسية وأن الأرض تدور حولها . ولم يسترد الجنس البشري حتى الآن وعيه من هول الصدمة التي أفقدته هذا المركز المتميز في الوجود .

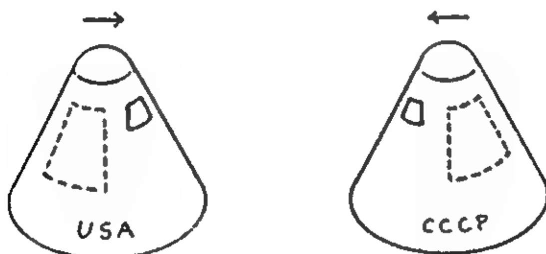
يجد الصبيان الصغار صعوبة في تقبل حقيقة أن الأرض تتحرك ، لأنها لاتولد شعوراً بأنها تتحرك . ويمكن أن نكتسب إداركاً عميقاً لطبيعة علم الميكانيك بتحليل سديد لنوع الحركة الذي يولد شعوراً . إن المسافر في الطائرة ، عندما يريد أن يعرف فيما إذا كان طائراً خلال الهواء أو ساكناً على الأرض ، ماعليه سوى أن يتطلع من النافذة الى ماهو خارجها كي يعرف الجواب . واذا كانت الطائرة دون نوافذ فسيتابه شك في الحركة ، لكن الاضطراب الذي تولده عاصفة عارضة ، أو مناورة الربان أثناء الأقلاع أو الهبوط ، يكفي لاقناعه بأنه محمول ومتحرك في الهواء . أما إذا كان الطيران منتظماً فإن شعوره بالحركة يختفي . والواقع أن من السهل جداً أن ينخدع المرء نفسياً بخصوص حالة حركته . ولا نشك في أن القارىء قد تعرض إلى ظاهرة شائعة تحدث للمرء الجالس في عربة قطار عندما يتوهم بأن قطاره آخذ بالحركة ثم يكتشف بعد وقت قصير أن قطاره مايزال ساكناً ، أما الذي كان يتحرك فهو القطار الذي كان يدرج على السكة المجاورة الموازية لسكة قطاره وبالاتجاه المعاكس .

إن تعميم الخبرات التي من هذا القبيل تظهر أن الاحساس بالحركة لايحدث إلا عندما تكون هذه الحركة غير منتظمة . فالاضطرابات الحركية للطائرة ، أي تغير سرعتها إبان صعودها أو هبوطها أو انعطافها أو تأثرها بالعاصفة ، يمكن أن يشعر بها الراكب الأعمى في الطائرة . كما أن الأندفاع الذي تعانيه الأجسام في القطار ، نحو الأمام أثناء

لجم الحركة المفاجىء أو نحو الوراء أثناء انطلاق القطار ، كاف لإقناع المسافر بأن قطاره هو الـذي يعـاني هذه الأمور ، لا القطار المجاور . وبدقيق العبارة نقول : إن الحركة ذات السرعة المنتظمة (دون تغير في قيمة سرعتها ولا في منحاها) لايمكن أن تُحس ، لكن الحركة المتسارعة ، أي تلك التي تتغير سرعتها ، زيادة أو نقصانا أو انعطافاً ، هي التي تُحس .

لقد وضع نيوتن هذه الاعتبارات ، وهي بالأحرى تأويلات بشرية ، ليؤمّن أساساً علمياً في صياغـة قوانينـه الحركية بحيث تكون مستقلة تماماً عن سرعة الجملة الفيزيائية ولتكون ، بدلاً من ذلك ، متعلقة بتسارعها فقط . فهو بذلك يكون قد عنى مايلي : إذا كانت جملتان متحركتين بسرعتين منتظمتين مختلفتين ، فلا يمكن بأية تجربة إقامة الدليل لتقرير أيهما الساكنة حقاً وأيهما المتحركة ولا التأكيد أن كلتيهما متحركتان . وليس من قول ذي معنى سوى القول بأن إحداهما تتحرك بالنسبة للأخرى حركة منتظمة (انظر الى الشكل ١ ـ ٥) . وقد جرت العادة في نسب حالة الحركة الى مرجع مقارنة ، ويمكن أن نتصور

شكل ١ ـ ٥ . السرعة المنتظمة نسبية . مركبتان فضائيتان تتقاربان بسرعة ١٠٠٠٠ كيلو متر في مكان ناء . إن أياً من القاطنين فيهما لايشعر بالحركة بل يظن أن مركبته ساكنة وأن المركبة الأخرى هي التي تتحرك نحوه . فمن هو المحق ؟ لايمكن الإجابة عن هذا السؤال . ولاقدرة لأي جهاز موجود في اي من المركبتين على أن يكشف الحركة المنتظمة للمركبة التي هو فيها . وكل مايمكن كشفه هو سرعة مركبة بالنسبة للأخرى .



راصداً افتراضياً مرتبطاً بكل مرجع . وعندئذ ندرك أن قوانين نيوتن تنكر وجود طائفة من المراجع متميزة بامكانية أن توصف بأنها في «حالة سكون» . فكل الحركات المنتظمة نسبية

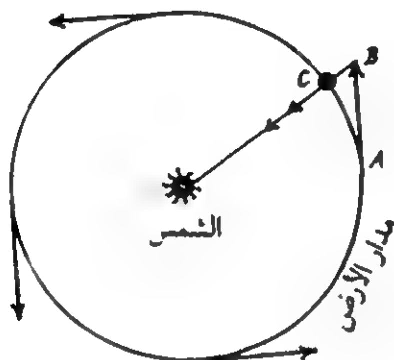
في ميكانيك نيوتن . فاذا قلنا إن سيارة تتحرك بسرعة ٥٠ كيلو متراً في الساعة فإننا بذلك نعني «٥٠ كيلو متراً في الساعة بالنسبة للطريق» . فقوانين نيوتن تتضمن أن هذا هو كل مايعنيه ذلك القول .

وكشيء يتميز بشدة عن نسبية السرعة المتنظمة تطرح قوانين نيوتن تسارع الحركة كشيء مطلق . وهذا معناه أننا نستطيع إقامة تجارب للإجابة بوضوح تام عن السؤال : « هل هذا المرجع متسارع (خلال الفضاء المطلق)؟» وأن هذه التجارب يمكن أن تقام بتمامها ضمن المرجع المتسارع نفسه دون حاجة لأن نستشير العالم الخارجي في هذا الشأن . فبالعودة إلى أحد الأمثلة التي سقناها آنفاً نستنتج أن البيضة الموضوعة على منضدة مستوية في طائرة متحركة بانتظام لا تفعل شيئاً يفشي سر الحركة المتنظمة للطائرة . لكن البيضة تتدحرج حتى تسقط وتنكسر إذا تباطأت الطائرة فجأة أو انعطفت حركتها . فالتسارع هو الذي يكسر البيضة ، لا الحركة المتنظمة .

إن الحركة المنتظمة تبدو في ميكانيك نيوتن وكأنها شيء غير ذي بال . ولهذا السبب لم يحاول نيوتن تعليل الحركة المتنظمة ، التي يمكن عندئذ اعتبارها حالة طبيعية . لكنه كان يرى ، في مقابل ذلك ، أن تسارع الحركة يحتاج لزاماً الى سبب ، وقد أطلق على مسببات التسارع اسم القوى . فالحجر مثلاً يهبط نحو الأرض لأن قوة التثاقل تسرِّعه نحو الأسفل . وهناك قوة مماثلة تتسلط على حركة الأرض حول الشمس . فقوانين نيوتن تدّعي أن سرعة كوكبنا في الفضاء لاتحتاج بحد ذاتها الى تعليل ، وهذا من حسن الحظ ، لأننا عندما نتطلع في اتجاه سرعة الأرض لا نرى شيئاً ذا بال يمكن أن يوجب هذه السرعة فحسب ، بل نرى أيضاً أن منحى الحركة يتغير باستمرار متبعاً انعطاف مسار الأرض حول الشمس . فهذا الانحناء في مسار الأرض هو الذي يتطلب من النظرية تفسيراً ، لأن الجسم الذي يتحرك في خط منحن يكون في كل الأحول متسارعاً باتجاه انعطاف المسار . فالكوكب المتحرك في خط دائري مثلاً يغير منحاه دوماً نحو مركز الدائرة (انظر الشكل ١ ـ ٦) . فدوام تسارع الأرض نحو مركز المدار هو الذي يجب أن نجد له تفسيراً ، ولا حاجة لتفسير السرعة في اتجاه الحركة . وعندما نتطلع نحو مركز مدار الأرض نرى بالفعل شيئاً ذا شأن ـ نرى الشمس . فالجذب الثقالي الناشيء عن الشمس هو الذي يجبر الأرض

المتحركة على الانعطاف الدائم نحو الشمس ولو حدث واختفت الشمس اتفاقاً فإن الأرض لابد أن تعود إلى الحركة المنتظمة فتندفع بعيداً الوثاق في خط مستقيم .

شكل ١ ـ ٦ . إن للحركة الدائرية تسارعاً الأرض تدور حول الشمس في مسار دائري تقريباً وبسرعة ثابتة القيمة . لكن منحى هذه السرعة متغير باستمرار ففي النقطة A تتجه حركة الأرض نحو B ، لكنها بسبب انحناء المسار تأتي إلى C لتغير اتجاه الحركة. على طول BC ، يتم نحو الشمس. إن هذا التغير في السرعة - أي التسارع - ينجم عن قوة التثاقل التي تسلطها الشمس لتجذب الأرض على طول المنحى BC (السهم المضاعف) إذ لا يوجد قوة تفعل في منحى السرعة المدارية (الأسهم المفردة) .



إن ما يسمى قانون نيوتن الحركي الثاني يقول إن تسارع الجسم يتناسب مباشرة مع القوة المسببة له ، المتسلطة على الجسم . وحاصل القسمة الثابت ، للقوة على التسارع ، يسمى الكتلة العطالية للجسم ؛ وبذلك نكتب :

القوة = (الكتلة العطالية) × (التسارع) (١ ـ ١)

وهكذا ، عندما تزول القوة يزول التسارع ، فيروح الجسم يتحرك حركة مستقيمة منتظمة . والمعادلة (١ ـ ١) لا تتغير بإضافة سرعة ثابتة إلى الجسم ، لأن تغير السرعة

وحده ـ التسارع ـ هو الذي يدخل في القانون الثاني . وتعبر المعادلة (١ ـ ١) أيضاً عن خبرتنا في أن الجسم كلما كان كبير الكتلة كانت عملية تسريعه بالقوة ذاتها أصعب (إن من الأصعب ان ندفع سيارة من أن ندفع دراجة) . ومن الواضح أننا لا نستطيع حل المعادلة (١ ـ ١) إلاّ إذا علمنا كل شيء عن القوة ، لأن هذه القوة قد تتغير بمرور الزمن أو بتغير موضع الجسم

هذا ولو قرأنا قانون نيوتن من اليسار إلى اليمين فانه يدل على أن الجملة المتحركة بانتظام لا تتسلط قوى على مكوناتها . وعلى هذا فان سلوك هذه المكونات (ربما الكائنات البشرية من ضمنها) لا يمكن أن يتأثر بالسرعة المنتظمة العالية . وهكذا فان أية حالة حركية منتظمة لا يمكن ان تتميز عن أمثالها بأية وسيلة ميكانيكية .

إن السبب في عدم اتضاح هذه المبادىء الحركية لعامة الناس يكمن في واقع أن خبرتنا اليومية تبدو لأول وهلة متناقضة مع هذه المبادىء . إذ يتضح مثلاً أننا نحتاج إلى قدرة محركة ـ قدرة المحرك البترولي هنا ـ كي نستطيع أن نحرك سيارة على طريق أفقي بسرعة منتظمة تساوي ٥٠ كيلومتراً في الساعة . فهل تتناقض هذه التجربة مع قانون نيوتن الثاني الذي يقضي بأن مثل هذه الحركة المنتظمة لابد لأن تستمر بطبيعة حالها دون توقف ، وبأن الحركة المتسارعة وحدها هي التي تتطلب قدرة محركة خاصة ؟ إن الجواب يكمن في واقع أن السيارة تتطلب قدرة محركة حتى للإحتفاظ بسرعة منتظمة ، لأن من الضروري التغلب على قوى الاحتكاك ومقاومة الهواء التي تحول دوماً دون استمرار الحركة عملياً والتي ، بموجب المبادىء المعروضة أعلاه ذاتها ، تؤدي إلى تباطؤ حركة السيارة حتى السكون (بالنسبة للطريق) بعد أن ينقطع فعل قوة المحرك عنها . أما في حركة الكواكب حول الشمس فان مثل قوى الاحتكاك هذه مهملة ولا حاجة لأن تؤخذ بعين الإعتبار . وسبب ذلك أن الأرض تتحرك في فضاء يكاد يكون خالياً تماماً ، وليس في وسط مادي يمكن أن يعيق حركتها . وهذا ما يحدث أيضاً للمركبة الفضائية التي ، بعد أن تكتسب من محركات الصاروخ تسارعاً يوصلها إلى خارج جو الأرض ، تستمر في رحلتها عبر الفضاء الخالي دون أن يعيق حركتها احتكاك ، فلا تتطلب بعدئذ أية قدرة محركة . إن الفضاء بحد ذاته لا يسلط أية قوة على الجسم المتحرك .

إن واقع تباطؤ الحركة واختفائها ، في حال زوال القوة المحركة عن الأجسام الأرضية ويسبب هذه القوى الاحتكاكية المبدِّدة ، هو الذي يطبع في الذهن الوهم بوجود حالة سكون طبيعية في هذا الكون تصل إليها الأجسام « المتحركة » بعد أن تستنفذ ذخيرتها من الطاقة و« تتوقف » . حتى أن بعض قصص الخيال العلمي المعقدة قد رسخت الاعتقاد بحقيقة هذا الوهم وذلك بالحاحها على تزويد المركبة الفضائية بمحركات وصواريخ تعمل دون توقف كي تحتفظ للمركبة بسرعة منتظمة في الفضاء . وفي أحد المسلسلات التلفزيونية الشهيرة كان على المركبة أن تتسمر « ميتة في الفضاء » ، بقدر محتوم ، بمجرد أن تنفذ طاقتها . فمما لا ريب فيه أن هذا النوع من السخافات ذو أثر ضار جداً في تثقيف الجمهور . ومن المؤسف جداً ، في عصرنا الذي شهد منذ أكثر من ثمانين عاماً تفوق نسبية آينشتاين على ميكانيك نيوتن ، أن بعض كتاب الخيال لم يدركوا بعدُ حتى مبادىء نيوتن التي عمرها الآن أكثر من ٣٠٠ عام !

والآن ، كيف تنطوي قوانين نيوتن الحركية ، بنجاحها المذهل في التوصيف الصحيح لمسارات الكواكب حول الشمس ، على نموذج المكان والزمان لديه ؟ إن الخواص الميكانيكية للأجسام لا تؤمّن وسيلة لتعيين مواقع هذه الأجسام في الفضاء ولا لتعيين سرعتها خلاله . وهذا يشكل ، بكل وضوح ، مستنداً قوياً لأصحاب النظرية العلائقية التي تدعي أن نسب الحركة إلى الفضاء نفسه أمر لا معنى له . بيد أن ميكانيك نيوتن ، على ما يبدو ، يفسر فعلاً إمكانية كشف بعض الحركات عبر الفضاء ، وهي الحركات المتسارعة . والتسارع يقود إلى قوى معروفة جيداً ، تسمى أحياناً قوى عطالية ؛ ومن هذه القوى مثلاً ضغط القدمين على أرض المصعد نحو الأسفل لفترة قصيرة هي فترة تسارع الحركة في بدء الصعود ، أو القوة النابذة التي تسعى إلى إبعاد الجسم الدوّار عن مركز الدوران (كما في حلقة الأطفال وهم يدورون معاً) . فليس من الضروري هنا أن ننظر إلى الأجسام المادية المحيطة بنا كي نشعر أن المصعد أو الجسم الدوار متسارعان .

ما هو أصل هذه القوى العطالية ؟ كان نيوتن يعزوها إلى الفضاء الذي يحدث فيه التسارع . فاذا صح هذا فان القوة النابذة الناشئة عن الحركة الدورانية بالنسبة للفضاء المحيط ستظل قائمة حتى ولو اختفت بقدرة قادر كل محتويات هذا العالم منه ، ما عدا

الجسم الـدوار . وعنـدئـذ يمكن أن يُتخـذ وجود قوى العطالة حجة لنقض وجهة نظر العلائقيين ودليلاً على حقيقة الخواص الفيزيائية للفضاء .

١ ـ ٤ ماخ والرؤية العلائقية .

وهكذا ، بينما نرى أن عجز ميكانيك نيوتن ، عن تقديم ما يفيد في تحديد موقع الجسم في الفضاء وقياس سرعته فيه ، يدعم الصورة العلائقية ، يبدو أن وجود التأثيرات العطالية يدعم نموذج نيوتن الفضائي كهيولة يمكن أن تفعل في الأجسام ، في بعض أنواع الحركة على الأقل .

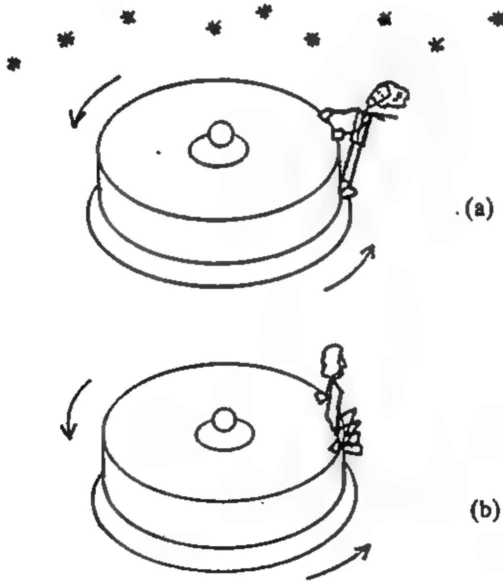
ومهما يكن الأمر فان الفحص العميق يكشف عن صورة غامضة بعض الشيء . فالقـول ببقـاء القـوى النـابـذة في عالم مجرد من كل مادتـه هو ، في نهاية الأمـر ، مقولة لا تتحقق ؛ إذ لا يوجد سوى عالم واحد ، ولا قدرة لنا على تفريغه من كل مادته . وعلى هذا يمكننـا ، سواءً بسـواء ، أن نستعيض عن فكـرة التسارع (أي الدوران) بالنسبة للفضـاء النيوتني فكرة التسارع بالنسبة لبقية المادة في العالم . لقد كانت هذه المحاكمة المستنـد الـذي اعتمـد عليه الفيلسـوف والفيزيائي إرنست ماخ E. Mach (نمسـاوي ، ١٨٣٨ ـ ١٩١٦) عنـدمـا لجأ ، لدعم مذهبـه ، إلى الاستعـانة بواقع تجريبي معروف جيداً(*) . إذا جعلنا نواساً حراً معلقاً لينوس عند أحد قطبي الأرض فانه لن يظل ، في تأرجحه بين الأمام والوراء ، في مستو واحد دوماً ، بل إن منحى اهتزازاته سيدور ببطء (في جهة دوران عقارب الساعة ، في القطب الشمالي) لينجز دورة واحدة كاملة في يوم واحد . ومن يرتاب في صحة هذا يمكنه أن يشاهد مثل هذا النواس في متحف العلوم في لندن . وتفسير هذه الظاهرة يكمن في دوران كرة الأرض حول محورها ، لكن بيت القصيد فيها هو أن مستوي الاهتزاز يظل ثابتاً بالنسبة للنجوم البعيدة . فهذا النواس ، المعلق حراً ، لا يتسارع ، بينما تدور الأرض تحته حول محورها .

نحن إذن أمام الواقع المرصود الذي يتجلى في جملة ميكانيكية لا تعاني قوى عطالية

(★) باسم نواس فوكو Foucault (المترجم) .

ويحدث لها أن تكون غير مسرَّعة بالنسبة للنجوم البعيدة (بالنسبة للمجرات في الحقيقة ، لأن النجوم معروفة بدورانها البطيء حول المجرة) . إن هذا الواقع يُعدّ في ميكانيك نيوتن محض صدفة لكنه ينطوي ، في رأي ماخ ، على أعظم مغزى . فهو عنده لا يوحي فقط بأن مقولة التسارع بالنسبة للفضاء يمكن أن تحل محلها مقولة التسارع بالنسبة للنجوم الثابتة ، بل يتضمن أيضاً أن الجمل الميكانيكية الموضعية (كالنواس مثلاً) لابد متأثرة بالمادة

شكل ١ ـ ٧ . هل هذا هو أصل العطالة ؟ إن الرجل الممسك بالقرص الدوار في (a) يشعر بقوة تسعى إلى إبعاده . فماذا يسبب هذه القوة ؟ يرى إرنست ماخ أن الرجل يشاهد أيضاً النجوم في حالة دوران : ويحس بزوال القوة عندما تتوقف النجوم عن الدوران . فهل هكذا تولِّد النجوم القوة العطالية ؟ إن كان هذا حقاً فان القوة لابد معدومة في الفضاء الخالي (b) . فنشوء هذه القوة لدى تسارع الجسم (دورانه مثلاً) هو الذي يزود الجسم بالعطالة ، أي بالكتلة العطالية . إن هذه الفكرة ما تزال من قبيل التكهنات .



البعيدة في هذا الكون كي « تعلم » ماذا كان مرجع المقارنة اللامتسارع . وعلى هذا فان ماخ يعزو القوى العطالية التي تعانيها الجمل المتسارعة إلى تفاعل مع المادة البعيدة في هذا الكون . انها نظرية عظيمة تتضمن أن القوة التي تدفعك إلى الوراء عندما تنطلق بسيارتك إلى الأمام ناجمة عن فعل المجرات التي تبعد عنك آلاف الملايين من السنين الضوئية ! فلو اختفت هذه المجرات من الوجود فان قوى العطالة ، في رأي ماخ ، لابد أن تنعدم . أي أن الدوران في فضاء خال لا يقذف قاطنيه بعيداً مهما بلغت سرعته . ففكرة الدوران برمتها تصبح حقاً في مثل هذا العالم فارغة من أي معنى .

إن ماخ لم يرفع قط تكهنه هذا إلى مرتبة النظرية الفيزيائية (حتى أنه لم يوضح قط طبيعة التفاعل) . لكن أناساً عديدين حاولوا ذلك بعده . وسنرى في الفصل الرابع كيف يخرج التثاقل من هذا التفاعل الفطري الذي يُبتدع ليكون الأداة الفعالة في مخطط ماخ . لكن النظرية المقبولة في التثاقل لاتبدو متفقة بشكل مقنع جداً مع أفكار ماخ . ورغم أن هذا النقص يؤدي إلى مستند لاحتواء مقولة التسارع بالنسبة للفضاء الخالي على معنى ، إلاّ أن هذه النظرية لا يبدو فيها أي مسوغ ناجم عن قوانين الميكانيك يبرر نموذجاً فضائياً تاماً يكون فيه أيضاً موقع معين للأجسام في الفضاء وسرعة فيه . ويوجد نموذج أقل تعقيداً ، وهو صورة نيوتنية جديدة ، يتلخص في فضاء فيه حركات (متسارعة) متميزة (بوجود قوى عطالية) بينما تؤلف حركات أخرى (منتظمة) صنفاً خاصاً (غير ذي قوى عطالية) . وتدعى حركات هذا الصنف بالحركات العطالية وتدعى مراجع المقارنة التي تظهر فيها هذه الحركات المنتظمة مراجع عطالية . وهكذا ، وبدلاً من أن يُنظر إلى الفضاء وكأنه هيولة ، يكون من الأدق أن يُعتبر صورة لشيء وظيفته إبراز الفروق بين شتى أنواع المراجع .

في صورة المكان والزمان النيوتنية الجديدة يغدو الكلام عن انفصال حادثين في الزمان شيئاً ذا معنى ، حتى برغم إمكانية حدوثهما في موقعين مختلفين . ولكن لم يعد شيئاً ذا معنى أن نتكلم عن انفصال حادثين في المكان إلاّ إذا حدثا متزامنين (أي في لحظة واحدة) .

ولفهم هذه الملاحظة فكّر في الحادث على أنه شيء يقع في آونة معينة من الزمن وذو موقع معين في الفضاء . لنتخذ رنين الميقاتية مثالاً . إن الحادثين المتمثلين برنيني الميقاتية في الساعة الواحدة وفي الساعة الثانية هنا ، في نموذج نيوتن ، مفصولان تماماً وبوضوح بفاصل

زمني قدره ساعة واحدة ، سواء كنا ، في المناسبتين ، جالسين قرب الميقاتية أو على سطح الشمس (وهو كرسي لابد حار جداً !) . بيد أننا عندما نسأل عن الفاصل المكاني بين الحادثين فان الجواب لن يكون معيناً تماماً . لأننا ، ونحن جالسون قرب الميقاتية ، لن نحس بأي انتقال مكاني لها في غضون الساعة الزمنية التي انقضت بين الرنينين ؛ وعلى هذا سنقول إن الحادثين قد وقعا في زمنين مختلفين لكن في المكان نفسه (في غرفة الجلوس مثلاً) . لكن من الصحيح أيضاً أن الأرض ، في غضون الساعة التي انقضت ، كانت قد انتقلت حوالي ١٠٠٠٠٠ كيلو متر في رحلتها حول الشمس ، مما يجعل الراصد الجالس على الشمس يعتقد أن الحادثين نفسيهما مفصولان بساعة واحدة في الزمان وبـ ١٠٠٠٠٠ كيلو متر في المكان . فكلا الراصدين متفقان على الفاصل الزمني لكنهما غير متفقين على الفاصل المكاني .

لو كان العالَم الفيزيائي متصفاً بقوانين نيوتن الميكانيكية وحدها ، فلا مناص للمرء من أن ينبذ الفضاء النيوتني لصالح الفضاء النيوتني الجديد . على أنه قد لا يوجد ما يمنع ظواهر فيزيائية أخرى من أن تكون قادرة على استشفاف بنية الفضاء بطريقة مستقلة عن حركة الأجسام المادية . فقد يمكن استخدام هذه الظواهر ، في تفاعلها مع المادة ، لتعيين سرعة الأرض مثلاً عبر الفضاء النيوتني . وللحكم على إمكانية وجود مثل هذه الظواهر لابد من استطراد قصير إلى نظريتي التثاقل والكهرطيسية .

١ ـ ٥ نظرية نيوتن في التثاقل الكوني .

إن التوفيق المذهل الذي أصابته نظرية نيوتن الميكانيكية في التوصيف الصادق لحركات الكواكب في المنظومة الشمسية ، بفعل قوة الثقالة ، هو واحد من أكثر نجاحاتها بروزاً . فمن خلال رصد هبوط الأجسام نحو الأرض (أو ، كما تقول القصة ، سقوط التفاحة) اقترح نيوتن نظرية للتثاقل الكوني . فبموجب هذه النظرية تتجاذب الأجسام المادية في هذا الكون ، كلاً نحو الكل ، بقوة تثاقلية . إن بعض معالم هذه القوة التثاقلية يمكن أن تُستنتج من الخبرة الشائعة . فخيط المطار المشدود ، بقوة الثقل (أي التثاقل) ،

نحو سطح الأرض يتدلى شاقولياً ، دالاً على أن القوة الفاعلة بين جسمين ماديين كرويين تقع على الخط المستقيم الواصل بين مركزيهما . إن قوة التثاقل بين جسمين يمكن أن تعزى إلى « شحنة » ثقالية ، كما تعزى القوة الكهربائية بين جسمين متكهربين إلى شحنة كهربائية .

وقد اكتشف غاليله Galilei (ايطالي ، ١٥٦٤ ـ ١٦٤٢) الواقع التجريبي الهام الذي سنناقشه بالتفصيل في الفصل الثالث والذي يتلخص بأن الأجسام المادية ، عندما تترك حرة دفعة واحدة ومن علو واحد ، تسقط متصاحبة متلازمة معاً نحو سطح الأرض فتصل إليه دفعة واحدة ، أي أنها تهبط بتسارعات متساوية . ولو ألقينا نظرة على قانون نيوتن الثاني (المعادلة ١ ـ ١) نرى أن تساوي التسارعات ، بفعل الثقل ، يستلزم أن تكون قوة التثاقل متناسبة مع كتلة الجسم العطالية . وببسيط العبارة نقول : إن الجسم الكبير الكتلة أصعب تسريعه من تسريع الجسم الصغير الكتلة ، لكن القوة التثاقلية التي تفعل في الأجسام تزداد مع ازدياد الكتلة بتناسب مباشر ، وهذا يعوِّض تماماً عن ذاك . يمكن أن نعبر عن هذا الواقع بقولنا : إن الشحنة الثقالية متناسبة طردياً مع الكتلة العطالية ، وهذا واقع ينطوي ، كما سنرى ، على مغزى من أعظم ما يكون .

وأخيراً ، وبمعرفة أولية لسلوك الكواكب في السماء ، نستدل أن الكواكب الأبعد عن الشمس تستغرق في دورة واحدة حولها زمناً أقصر مما تستغرقه الكواكب الأقرب . فلابد إذن من أن تتناقص القوة الثقالية بتزايد المسافة .

إن قانون التثاقل الذي اقترحه نيوتن يقول إن شدة القوة F بين جسمين (مرصوصين) كتلتاهما m_1 و m_2 والمسافة بينهما r تتعين بالمعادلة :

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \qquad (١ - ٢)$$

حيث G ثابت له قيمة واحدة من أجل كل الأجسام في هذا الكون . انه معروف باسم ثابت نيوتن التثاقلي وهو ثابت تناسب (ذكرناه قبل قليل) لازم لتحويل وحدات الكتلة إلى وحدات الشحنة الثقالية .

ولنيوتن ، بخصوص القوة (١ ـ ٢) ، افتراض هام بعيد المدى يقول إنها تفعل آنيا عبر الفضاء الخالي بين الجسمين . فنحن إذن أمام نظرية تقول بالفعل الآني عن بعد . والآنيّة مفهوم معين تماماً بموجب نموذج نيوتن الزماني ، لأن هذا النموذج ينطوي على معنى واضح لمدلول « الوقت نفسه » ، حتى في النقطتين المفصولتين بالمسافة r ، أي أن الزمن المقيس في جوار كلا الجسمين هو الزمن الشامل الكوني الأحد .

لقد استطاع نيوتن ، بضم قانونه التثاقلي (١ ـ ٢) مع قانونه الأساسي في الحركة (١ ـ ١) ، أن يتنبأ بأن مسار الكوكب حول الشمس لابد أن يكون إهليلجاً . إن هذا صحيح وهو يمثل نجاحاً باهراً لميكانيك نيوتن ولفلسفته على حد سواء : فهو قد أثبت أن « الأجرام السماوية » ، حتى هي وبهذه الصفة التي ألصقت بها ، تذعن لهذه القوانين « الوضيعة الأرضية » التي تم اثباتها في المخابر الدنيوية . إن هذا الدرس التاريخي تكرر مرات ومرات ؛ فكلما اكتُشف قانون جديد على الأرض ظهر أنه صحيح حتى في أنأى مناطق الكون التي نستطيع رؤيتها .

١ ـ ٦ كهرطيسية مكسويل والأثير .

رغم النجاحات العظيمة لفكرة الفعل عن بعد في شرح حركة الكواكب حول الشمس بفضل قوة التثاقل الآنية لم تستطع نظرية نيوتن أن تقدم شرحاً صادقاً للأمور المشابهة جداً التي تظهر في أثناء حركة الجسيمات المشحونة بالكهرباء عندما تتفاعل فيما بينها عبر الفضاء الخالي بواسطة القوى الكهربائية والمغنطيسية . فعلى شاكلة الأرض المضطرة إلى الانحراف في حركتها عن الخط المستقيم لتنعطف بتأثير قوة التثاقل نحو الشمس باستمرار ، كذلك يفعل الجسيم المشحون بالكهرباء ، كالالكترون ، مضطراً إلى اتباع مسار منحن بتأثير القوى الكهربائية والمغنطيسية . فالصورة الحديثة للذرة تشبه ، فعلاً ومن عدة وجوه ، صورة منظومة شمسية تحتل مركزها النواة الذرية المشحونة ايجابياً (وهي تمثل الشمس) وتدور الالكترونات الخفيفة حول النواة على مسافات بعيدة وبسرعات كبيرة .

ومع ذلك يوجد ثلاثة فروق هامة بين القوى التثاقلية والقوى الكهرطيسية . فاولاً ، بعض الجسيمات فقط تحمل شحنات كهربائية بينما كل أشكال المادة والطاقة تحمل شحنات

ثقالية . ثانياً ، إن القوى الكهربائية يمكن أن تكون تجاذبية أو تنافرية مما يتيح لنا أن نصف إحدى مجموعتي الجسيمات التي تحمل شحنات من نوع واحد بأنها موجبة والمجموعة الأخرى بأنها سالبة الشحنة : فالشحنتان المختلفتان كهربائياً تتجاذبان والشحنتان المتماثلتان تتنافران : لكن الشحنات الثقالية متجاذبة دوماً . إن سبب تنافر الشحنات المتماثلة في الكهرباء يمكن أن يعزى إلى واقع أن القوة الكهرطيسية هي متجهة قوة Vector (*) ، أي أن منحاها يمكن أن يتغير كما يمكن أن تتغير شدتها (لهذا السبب يجب علينا أن نُدخل فكرة القوى المغنطيسية على أنها قوى كهربائية) ، بينما قوى التثاقل تجاذبية دوماً على المنحى الذي يصل بين الجسيمين . أما الفرق الثالث والأخير بين قوتي الطبيعة الأساسيتين هاتين فتخص نسبة شدتيهما . فلو قلت إن القوى الكهرطيسية التي تسود في الذرة أشد بكثير من مقابلاتها في التثاقل لكان حكمك متواضعاً جداً ؛ فالأولى أشد من الثانية بـ ١٠^{٣٩} مرة (تذكر أن هذا العدد هو واحد متبوع بـ ٣٩ صفراً) . فكل ظواهر الحياة اليومية تقريباً هي ، لهذا السبب ، محكومة بالقوى الكهرطيسية . على أن وجود نوعين متعاكسين من الشحنات الكهربائية ، بالإضافة إلى وفرة التراكمات المادية ، كالأرض مثلاً ، يجعل هذه التراكمات شبه معتدلة كهربائياً . أما قوى الشحنات الثقالية لمكونات الذرة فهي ، بخلاف ذلك ورغم ضعفها الفائق ، تنضاف معاً في كل الظروف . وعندما يصل المرء إلى تراكم مادي من حجم الأرض ـ بعدد ذراتها الهائل ، ١٠^{٥٠} ذرة ـ يفهم لماذا يتغلب التثاقل على قوى أعظم بالفطرة منه بكثير جداً ، فهو يسيطر عليها بوزن العدد .

إن عجز الفيزيائيين الأولين عن صياغة نظرية كهرطيسية في الفعل عن بعد يعود إلى هذه الفروق ، ويعود أيضاً في أعماقه إلى موضوع اللاتناظر الزمني ، كما سنرى في الفصل السادس . وقد أمكن في السنوات الماضية تدارك هذا العجز فأصبح بالامكان إعادة سبك النظرية الكهرطيسية ، وموضوع التحريك الكهربائي المتصل بها (حركة وفعل الجسيمات المتكهربة) ، في نموذج لغوي واحد للفعل عن بعد .

إن الفتح العظيم الذي تم إحرازه في فهم القوى الكهرطيسية جاء من الفطنة

(*) كثيراً ما سندعوها شعاع القوة عندما لا نخشى الإلتباس . (المترجم) .

الرياضية اللامعة لفيزيائي القرن التاسع عشر البريطاني جيمس كليرك مكسويل J. C. Max-well (١٨٣١ ـ ١٨٧٩) . لقد جمع مكسويل معاً النتائج التجريبية التي أوجدها هانس أرستيد H. Oersted الدانيمركي (١٧٧٧ ـ ١٨٥١) وتلك التي حصل عليها ميكائيل فارادي الإنكليزي (١٧٩١ ـ ١٨٦٧) وهاينريش لنز الروسي (١٨٠٤ ـ ١٨٥٦) وغيرهم ، جمعها في مجموعة مترابطة من معادلات رياضية تتضمن وصفاً جميلاً وصادقاً للعلاقة بين حركة الجسيمات المتكهربة وسلوك القوى الكهرطيسية . كانت نظرية مكسويل كلها تستند على نشوء مفهوم جديد عميق وبعيد المدى في الفيزياء ، هو مفهوم الحقل . وبصياغة قوانين الكهرطيسية بلغة الحقل أزاح مكسويل دفعة واحدة كل الصعوبات الملازمة لفكرة نيوتن في الفعل عن بعد وفتح بذلك طريقاً جديداً تماماً في تاريخ علم الفيزياء .

إن الحقل مفهوم هو ، من عدة وجوه ، أكثر تجريداً من الجسيم . كان مكسويل يرى أن كل جسيم مشحون محوط بحقله الكهرطيسي الخاص به على شاكلة هالة غير مرئية لا تتجلى إلاّ إذا وُضعت فيها جسيمات مشحونة أخرى . وفعل الحقل هو عندئذ تسليط قوة على الشحنات . كان فيزيائيو القرن التاسع عشر يحبون توصيف الحقل بالتشابه القريب مع حركة الموائع . ومن هنا برز استعمال كلمات مثل التدفق المغنطيسي وخطوط القوة (على شاكله خيوط التيار) ، وهي كلمات ما تزال حتى اليوم قيد الاستعمال . لكن توصيف الموائع يتضمن وسطاً ، من نوع ما ، ينقل الفعل من شحنة لأخرى . وكان الاعتقاد بهذا المائع راسخاً ، في القرن التاسع عشر ، لدرجة أن أُعطي له اسم ـ الأثير . وكان هذا الوسط يُفترض مالئاً الفضاء الخالي كله رغم أنه كان يعني الخفاء التام . أما الحقل الكهرطيسي فكان يُفكر فيه وكأنه توتر في الأثير . حتى أنه ، وهذا من أكثر خواصه إثارة ، يتمتع بإمكانية جديدة . ففي الأوساط الأكثر شيوعاً ، كالهواء ، يمكن للاضطراب أن يولِّد اهتزازات على صورة أمواج ضغطية (كأمواج الصوت العادية) تسير عبر الهواء من منطقة الاضطراب بسرعة معينة تتعلق بدرجة مرونة الهواء . وبالأسلوب نفسه لابد لاضطراب الجسيمات المشحونة من أن يولد أمواج توتر في الأثير المفترض . ويمكن ، فوق ذلك ، حساب سرعة هذه الأمواج بسهولة من الخواص الكهربائية والمغنطيسية للوسط وهو في حالة الفضاء « الخالي » هذه . وفي العصر الذي شهد نبوّة مكسويل بوجود هذه الأمواج

الكهرطيسية كانت قيم المقادير اللازمة لاجراء الحسابات معروفة ، فتبين أن سرعة أمواج الأثير كبيرة جداً بالفعل ـ في حدود ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية . ونحن اليوم نؤمن بأنها أعظم سرعة يمكن أن توجد في هذا الكون (فيما يخص الأشياء المعروفة على الأقل) . لكنها كان لها في عصر مكسويل معنى عظيم آخر : لقد كانت قريبة جداً من سرعة انتشار الإشارات الضوئية التي قاسها أولاوس رومر O. Romer (دانيمركي ، ١٦٤٤ ـ ١٧١٠) من خلال رصد مدارات أقمار كوكب المشتري ! لقد حققت الفيزياء بذلك قفزة رائعة إلى الأمام ؛ إذ بدا أن الضوء أمواج كهرطيسية تتولد من حركة الجسيمات المشحونة بالكهرباء وتسير في الفضاء على صورة اهتزاز أثيري .

ولم يقف الأمر عند هذا الحد . فعلى شاكلة تفاوت الأمواج الصوتية بالنغم (التواتر) يمكن أن تتفاوت به الأمواج الكهرطيسية . وفي الحقيقية ، إذا طرأ تغير طفيف على تواتر الموجة الضوئية فان هذا التغير يتجلى في تغير لون الضوء . ولكن ماذا يحدث إذا كان التغير كبيراً ؟ إن الضوء ينشأ عن تغيرات عنيفة تحدث ضمن الذرة عندما تصبح مُثارة ، بفعل التسخين الشديد مثلاً . بيد أن من الممكن ، في المخبر ، توليد اضطرابات أقل عنفاً بوسائل كهربائية تجعل الجسيمات المشحونة تدور بتواتر أصغر نسبياً . فهل يمكن كشف هذه الأمواج ؟ إن هذا ممكن فعلاً ، فهي ليست سوى أمواج الراديو التي فتش عنها هاينريش هرتز H. Hertz (ألماني ، ١٨٥٧ ـ ١٨٩٤) وأنتجها بعد نبؤة مكسويل بحوالي عشرين سنة . واليوم أصبح طيف تواتر هذه الأمواج الكهرطيسية مألوفاً بتمامه لدى الفيزيائيين . فكما توجد الأمواج الراديوية والمكرونية يوجد الإشعاع الحراري (تحت الأحمر) وفوق البنفسجي والأشعة السينية وأشعة غاما . وكلها تنضوي واضحة مفهومة في نظرية مكسويل التي يزيد عمرها اليوم عن قرن وربع القرن .

ويمجيء الأمواج الكهرطيسية أصبح تحت تصرف الفيزياء طريقة فعالة لامتحان نموذج نيوتن عن المكان والزمان . إن الأزمة التي نجمت عن هذا الامتحان في أوائل القرن الحالي ، والبناء الرياضي والفيزيائي الذي انبثق منها ، برزا كنقطة انعطاف في تاريخ الفيزياء والفكر البشري يضاهي في أهميته الثورة النيوتنية التي قامت قبلها بقرنين من الزمان . لقد قاد هذا الانعطاف إلى نظرية النسبية .

٢ ثورة النسبية

٢ ـ ١ المكان والزمان في أزمة .

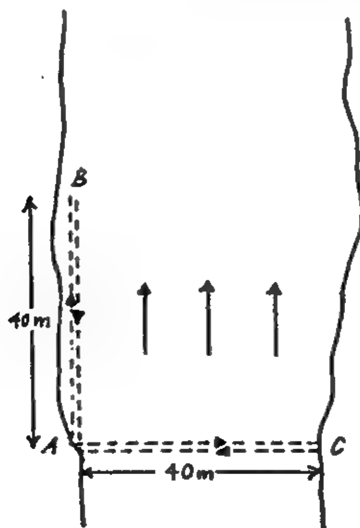
إن موقع جسم ما أو سرعته في فضاء نيوتن المطلق لايمكن كشفهما بأية تجربة ميكانيكية . ومهما يكن من أمر فان ظهور نظرية مكسويل الكهرطيسية أتاح إمكانية استخدام الضوء ـ حركة الإشارة الضوئية ـ لقياس سرعة الأجسام في الفضاء . إن نجاح مثل هذه المغامرة يتوقف جوهرياً على صورة أثير مكسويل ، هذا النوع من المائع الذي يملأ الفضاء كله (والمفترض ساكناً) . فحركة جسم في الفضاء يمكن استنتاجها من حركته في الأثير المزعوم .

لقد كان يُظن ، على وجه الخصوص ، أن سرعة الأرض في الأثير يمكن تعيينها على أساس المحاكمة التالية : إن الأرض ، في أثناء دورانها حول الشمس ، تتحرك بسرعة متغيرة في خلال الأثير . فمن وجهة نظر (مرجع مقارنة) راصد موجود على الأرض يبدو الأثير « ريحاً لافحة » أو « تياراً » ؛ تياراً تافهاً بالتأكيد ، إن ميكانيك نيوتن يمنعه من أن يسلط أي قوة أو احتكاك على الأرض المتحركة ، وإلا لكان قد أبطأ حركتها وتسبب في سقوطها على الشمس منذ دهر بعيد . ومع ذلك كانت ريح الأثير تُعتبر في القرن التاسع عشر حقيقة لا مراء فيها . وكان التحدي يتلخص في قياس سرعة انسيابها . وكانت نظرية مكسويل تتنبأ بأن الضوء يسير في خلال الأثير بسرعة ثابتة لا تتعلق إلّا بـ « مرونة » هذا الوسط . ينتج من هذا أن سرعة الضوء ، كما يقيسها راصد مرتبط بالأرض ، تتوقف على جهة سير الضوء ؛ أي أن الضوء الذي يسير باتجاه ريح الأثير ، مثلاً ، ينجرف مع التيار بسرعة أكبر من سرعة الضوء الذي يسير بعكس اتجاه تيار الريح .

كانت الجهود التي انصبت على تعيين سرعة ريح الأثير فائقة المهارة . وأشهر هذه التجارب كانت تلك التي أنجزها ، عام ١٨٨٧ ، الفيزيائيان الأمريكيان ألبرت مايكلسون A. Michelson (١٨٥٢ ـ ١٩٣١) وإدوارد مورلي E. Morley (١٨٣٨ ـ ١٩٢٣) . إن

مبدأ هذه التجربة يتضح جيداً بالتشبيه مع نهر عادي . إذا عبر سابح نهراً ، من الضفة إلى الضفة ، ثم عاد إلى الضفة الأولى فسيستغرق زمناً أقصر من الزمن الذي يستغرقه زميل له يسبح موازياً للضفة ويقطع في كل من الذهاب والإياب مسافة تساوي عرض النهر (انظر الشكل ٢ ـ ١) . والسبب في ذلك بسيط . فالسابح الثاني يتعامل مع التيار ، وهو يساعده

شكل ٢ ـ ١ . سباق الضوء (مايكلسون ـ مورلي) . سعيد وخالد يسبحان بسرعة أربعة أمتار في الثانية عندما يكون الماء راكداً . ينطلقان من النقطة A معاً ، سعيد يسبح باتجاه تيار النهر حتى B ثم يعود ضد التيار ، ويسبح خالد على منحى عرض النهر مسافة مساوية حتى C ويعود . إن خالد يربح السباق دوماً ، والسبب بسيط . لنقل ان سرعة تيار النهر تساوي مترين في الثانية ؛ فيصل خالد إلى C بعد ١١٫٥٦ ثانية ؛ لكن سعيداً ، الذي يساعده التيار فيجعل سرعته ستة أمتار في الثانية بالنسبة للضفة ، يصل إلى B بعد ٦٫٦٦ ثانية . أما في العودة فان التيار يعوق حركة سعيد ويجعل سرعته مترين فقط في الثانية بالنسبة للضفة فيقطع ٤٠ متراً في ٢٠ ثانية ، وبذلك تستغرق رحلته ٢٦٫٦٦ ثانية . لكن خالداً يلزمه للعودة ١١٫٥٦ ثانية أيضاً ، وبذلك تستغرق رحلته ٢٣٫١٢ ثانية ، فيعود إلى A قبل سعيد بـ ٣٫٥٤ ثانية .



عندما يسبح باتجاهه ويعوقه عندما يسبح ضده ؛ فرحلة العودة ، وهي أبطأ ، تستغرق زمناً أطول ، والإعاقة تفوق المساعدة بقليل . وتكون نتيجة ذلك أن يصل عائداً إلى نقطة الإنطلاق بعد عودة زميله الذي كانت إعاقته ضعيفة في الذهاب والإياب لأن اتجاه حركته يصنع في كليهما زاوية مع تيار النهر .

لقد استعمل مايكسلون ومورلي حزمتين ضوئيتين «سابحتين» في الأثير وارسلاهما لتذهبا وتعودا ، في منحيين متعامدين . وقاما بقياس دقيق للفاصل الزمني بين عودتيهما . فكانت النتيجة محيرة حقاً . وعندما ننظر إليها بمنظار اليوم نجد أنها تمثل الضربة القاضية التي وجّهتها الفيزياء التجريبية فحطمت بناءً نيوتنياً ، للمكان والزمان ، كان عمره آنئذ مئتي عام . إذ بالرغم من أن الإمكانيات التجريبية لجهاز مايكسلون ومورلي كانت قادرة على قياس فارق زمني أقل بكثير من الفارق الزمني الناتج عن سرعة الأرض المدارية (أو سرعة ريح الأثير إن شئت) ، فإن الرجلين لم يجدا أي فارق بالمرة . لقد تسمرت نظرية الأثير حيث وُلدت ، ولم يكتب لها الاستمرار في الحياة منذئذ .

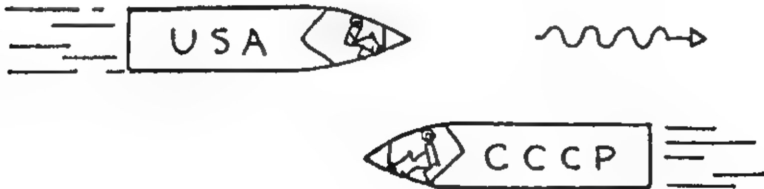
إن عدم وجود ريح أثيرية كشف عن أن بناء الفيزياء كان قائماً ، حتى ذلك الوقت ، على أساس هش . ففكرة المرجع المطلق الساكن الذي يمكن فيه قياس سرعة الجسم من خلال الفضاء الخالي هي فكرة وهمية برمتها . والحركة المنتظمة لاتكتسب هذه الصفة إلا منسوبة إلى جملة مادية أخرى . وليس الميكانيك وحده عاجزاً عن كشف السرعة المطلقة للجسم في الفضاء ، بل وكل التجارب الفيزيائية مهما كان الفرع الذي تنتمي إليه . إن مفهوم الحركة المنتظمة في فضاء راكد مفهوم لا مدلول له . وبذلك أصبح الأثير ، كالسيمياء والحرور ، عضواً آخر في متحف الغرائب العلمية التاريخية . وقد اقترح آينشتاين مبدأً غريباً جديداً يحل محله .

إن مبدأ النسبية الخاصة الجديد بدا في أول الأمر مسالماً ومالبث أن ظهر محيراً . إنه يقرر أن سرعة الضوء هي هي ، ثابتة في كل مكان . وهذا يعني أن للضوء سرعة واحدة سواء قيست على الأرض أو ضمن صاروخ سريع أو كان منبعه ساكناً أو مقترباً من الراصد أو مبتعداً عنه . ولدرجة أنه لوقاس راصدان سرعة حزمة ضوئية واحدة وهما متحركان

سريعاً ، أحدهما نحو الآخر ، فسيجدان لسرعة الحزمة نفسهاالقيمة نفسها ، حتى ولو كانا آنذاك جنباً الى جنب .

قارن هذا المبدأ بالافتراض القديم القائل بأن النور يسير بسرعة ثابتة في خلال الفضاء . إذ يتتج من هذا الافتراض أن المسافر في صاروخ سريع جداً (انظر الشكل ٢ ـ ٢) للقاء حزمة ضوئية سيقترب منها بسرعة أكبر من سرعة زميل له في صاروخ مماثل مسافر بالاتجاه المعاكس تتعقبه الحزمة الضوئية فتلحق به وتتجاوزه . إن هذا الكلام صحيح حقاً لو كانت الاشارة موجة صوتية ، ولا يخطر على بال أحد أن يشك بصحتها في حالة موجة ضوئية . لكن آينشتاين ينفي صحتها في هذه الحالة الثانية ، فهو يقول إن الصاروخين يلتقيان الضـ ، بسرعة واحدة ! فيتتج من هذا القول أنه مهما كانت سرعة الصاروخ كبيرة فإن الضوء الذي يبتعد عنه يفعل ذلك بسرعة ثابتة هي ، فوق ذلك ، لاتختلف عن سرعة اقتراب الضوء من الصاروخ الذي يتجه نحوه .

شكل ٢ ـ ٢ إن للضوء سرعة واحدة بالنسبة لكل الناس . المسافر الفضائي الأيسر يتعقب الاشارة الضوئية . إن سرعتها تفوق سرعته بـ ٢٫٩٩٨ × ١٠^٨ متر في الثانية مهما كانت سرعته كبيرة . المسافر السفلي يفر من الاشارة نفسها . وهي تبتعد عنه بسرعة ٢٫٩٩٨ × ١٠^٨ متر في الثانية مهما كانت سرعته . المسافر الأيسر يتسارع (سألحق بها وأسبقها) . إن سرعتها ستظل أكبر من سرعته بـ ٢٫٩٩٨ × ١٠^٨ متر في الثانية مهما فعل . أي أنه ليس أحسن حالاً من المسافر الأيمن المتحرك بالاتجاه المعاكس .

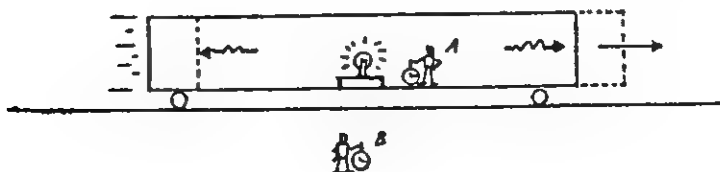


من الواضح أن مبدأ ثبات سرعة الضوء هذا يفسر فشل مايكسلون ومورلي في كشف أي فارق زمني بين ماتستغرقه حزمتان لتقوما برحلة مغلقة في «الأثير» ذلك أن الحزمتين تسافران بسرعة واحدة دون أن يكون لاتجاه حركة الأرض تأثير على هذه السرعة . لاشك أن هذا المبدأ لايكون له معنى إلا إذا استُبعدت فكرة الفضاء الساكن والزمن الشامل . إذ لابد من حدوث شيء غير مألوف يجعل الصاروخ عاجزاً عن أن يكسب ولو خطوة صغيرة بالنسبة للحزمة الضوئية مهما كان محركه قوياً .

٢ ـ ٢ هزيمة الزمن النيوتني .

إن تقدير مدى الغرابة التي تطرأ على سياق الحوادث والأشياء ، من جراء افتراض أن سرعة الضوء ثابتة ، يتم عادة من خلال مثال يساق عن سفرة إنسان في عربة قطار سريع جداً (لاشك أن اختيار هذا المثال المتواضع في مناقشة من هذا النوع ينبىء عن واقع أن القطار كان أسرع ناقل معروف عام ١٩٠٥) .

شكل ٢ ـ ٣ . التزامن نسبي . إن الراصد A يرى أن الاشارتين الضوئيتين تصلان إلى نهايتي العربة في لحظة واحدة لأنهما تنتقلان بسرعة واحدة في العربة . والراصد B يعتقد أنهما تنتقلان بسرعة واحدة على طول السكة . لكن القطار العظيم السرعة يكون ، أثناء فترة انتقال الاشارة (وهي فترة قصيرة جداً ، ربما عُشر مكروثانية) ، قد تقدم الى الوضع المشار إليه بالخط المتقطع . فالاشارة الذاهبة نحو اليسار تصل إلى الطرف الخلفي للعربة قبل أن تصل الاشارة الذاهبة نحو اليمين إلى طرف العربة الأمامي .



إن الحصول على مفعول محسوس يتطلب فعلاً أن يكون القطار سريعاً جداً ـ أن لا تكون سرعته بعيدة جداً عن سرعة الضوء ، بالنسبة للسكة طبعاً . ولما كانت مثل هذه السرعة غير متوفرة عملياً في القرن العشرين (حتى أن سرعة الأرض نفسها حول الشمس لاتتعدى جزءاً صغيراً من سرعة الضوء) فإن هذا يفسر لماذا لا نشعر بشيء غريب في أسفارنا التي نقوم بها في حياتنا العادية ولماذا تأخر اكتشاف نظرية النسبية كل هذه المدة . ومع ذلك سنفترض أننا نتعامل مع قطار ذي سرعة غير عادية .

الراصد A ، الراكب في عربة القطار (انظر الشكل ٢ ـ ٣) مجهز بمصباح كهربائي موضوع في مركز العربة تماماً . وعلى زيق السكة ينتظر زميله B مرور القطار ويمكنه أن يرى المصباح وكل ما في داخل العربة . يتفق A و B على مايلي : القطار السريع سيتحرك بسرعة ثابتة حتى يمر أمام B . وأثناء ذلك ، وفي لحظة مناسبة ، يرسل المصباح برقاً قصير الأمد على منحى طول العربة . وعندما تصل الاشارتان البرقيتان الى طرفي العربة يسجل كل من A و B لحظتي الوصول .

إن نتيجة هذه التجربة التخيلية لابد أن تكون غريبة . فالراصد A ، المسافر في القطار ، يرى أن الاشارتين تنطلقان من مركز العربة معاً وتصلان إلى طرفيها في لحظة واحدة ، ذلك لأن سرعة الضوء واحدة في الاشارتين وهما تقطعان مسافتين متساويتين . لكن نتيجة الراصد B ، الواقف على زيق السكة ، ستكون غير ذلك ، فهو سيرى أيضاً الاشارتين تنتقلان بسرعة واحدة في اتجاهين متعاكسين ، لكن هذه السرعة مقدَّرة بالنسبة له في مرجعه الخاص الساكن بالنسبة للسكة ، ونتيجة ذلك سيرى أن الاشارة الذاهبة نحو اليسار (شكل ٢ ـ ٣) تصل الى طرف العربة الأيسر قبل أن تصل الاشارة الذاهبة نحو اليمين إلى الطرف الأيمن . وسبب هذا الاختلاف هو أن القطار والمنبع الضوئي متحركان كليهما بالنسبة لـ B ، مما يعطي للقطار فرصة انتقال صغير نحو اليمين أثناء زمن ذهاب الاشارتين . فالاشارة الذاهبة نحو اليسار تقطع مسافة أقصر من المسافة التي تقطعها الاشارة الذاهبة نحو اليمين ، فتصل قبلها لأن سرعتيهما واحدة .

إن الراصدين A و B يعطيان إذن نتيجتين مختلفتين للحادثين نفسيهما . فمن المصيب ؟ هل تصل الاشارتان حقاً متزامنتين الى الطرفين . أم أن اليسرى تصل قبل

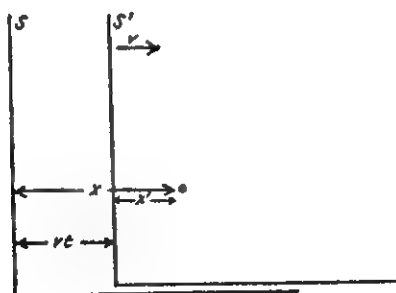
اليمنى ؟ تقول نظرية النسبية إن كليهما مصيب . ولا مجال لأن نقول : «إن A متحرك ، فهو إذن المخطىء» ، لأن حركة A المتظمة ليست بذات بال . إنها فقط حركة بالنسبة لـ B . ويمكن تماماً للمرء أن يقول إن القطار ساكن وإن الأرض تتحرك بالنسبة له في الاتجاه المعاكس . وهذا في الواقع أكثر إقناعاً بالفعل لأن الأرض متحركة يقيناً حول الشمس . فنظرية النسبية الخاصة تقضي بعدم وجود مراجع مقارنة متميزة ، وليس لأحد الحق في أن يقول إنني على «صواب» وإن كل امرىء يختلف في الحركة عني على «خطأ». والنتيجة التي لامناص من القبول بها هي أن بعض الظروف ، التي كانت تعتبر قبل ذلك موضوعية بمعنى ما ، ليست موضوعية بالمرة وانما هي ظروف نسبية محضة ، أي بالنسبة لحالة حركية معينة . وبصورة خاصة تقول نظرية النسبية إن تزامن حادثين مفصولين مكانيا ليس خاصية مطلقة من خصائص الحادثين بالذات وإنما هو نتيجة لظروف رصدهما . فالذي يشكل نفس اللحظة عند طرفي العربة بالنسبة لـ A لايشكل نفس اللحظة بالنسبة لـ B .

إن هذه الرؤية الجديدة للزمن تبدو غريبة لأول وهلة . فقبل نظرية النسبية كان المعتقد أن الزمن واحد لدى راكب القطار والراصد الساكن قرب السكة ولدى أي إنسان آخر ولو كان على المريخ . فالزمن النيوتني مطلق وشامل ولايتوقف على حالة المرء من السكون والحركة في هذا الكون . إن هذه الصورة للزمن كأساس ثابت أو كمرجع وحيد نعتمد عليه في دراسة الحوادث أصبحت اليوم خاطئة ، ولا وجود لما نسميه نفس اللحظة الشاملة .

ولمبدأ النسبية نتائج أكثر غرابة نراها إذا تصورنا قطاراً ثانيا يقل راكباً ثالثاً ، C ، في قطار يسير على سكة موازية في الاتجاه نفسه . فاذا كانت سرعة C أكبر من سرعة A فإن A يبدو لـ C متحركاً في الاتجاه المعاكس ، من اليمين إلى اليسار في الشكل ٢ - ٣ . ونرى بمحاكمة مماثلة لما سبق أن C سيلاحظ أن الاشارتين الضوئيتين الصادرتين عن مصباح A يصلان إلى طرفي عربته في لحظتين مختلفتين . وفي هذه الحالة فقط ، وبسبب الحركة من اليمين الى اليسار ، يرى C أن الاشارة الذاهبة نحو اليمين هي التي تصل الى هدفها أولاً . وهذا يدل على أن ترتيب الحادثين لدى C هو عكس ترتيبهما لدى B ، أي أن B يرى الاشارة اليسرى تصل هدفها أولاً بينما يرى C عكس ذلك (وهو محق أيضاً) . وبذلك نرى أن

النسبية تدمِّر العلاقة (الترتيب) «قبل ـ بعد» بين الحادثين المفصولين مكانياً . لكنها ، على كل حال ، لا تدمر هذه العلاقة لو كان الحادثان متهاكنين(يحدثان في مكان واحد) أو ، وهذا يمكن أن نستنتجه دون صعوبة ، إذا كان الراصد يستغرق للوصول من موقع أولهما لموقع الثاني فترة زمنية تساوي الفترة الفاصلة بينهما وهو يتحرك بسرعة الضوء أو بأقل منها . ففي الحقيقة لايمكن لأي راصد أن يغير حالته الحركية بحيث يستطيع أن يرى الزمن عائداً الى الوراء في مرجع آخر غير مرجعه . وكل مايمكن أن تفعله حالته الحركية هو أن تؤثر في معدَّل سير الميقاتيات التي يراها(*) . ورغم أن ترتيب الحادثين المتهاكنين غير متغير (كترتيب دقـات الميقاتية) إلا أن المدة الفاصلة بينهما تختلف باختلاف سرعة الراصد . وسبب هذا الاختلاف يمكن أن يفهم بسهولة إذا استخدمنا أوليات علم الجبر ، لكن القارىء الذي لايحب هذا العلم قد يرغب في تخطي هذا البرهان وفي استئناف هذه المناقشة بعد المعادلة ٢ ـ ٦ ، وله أن يفعل .

لنتصور راصدين عطاليين (أي متحركين بانتظام) ، A و B ، يتحرك أحدهما بالنسبة للآخر بالسرعة v على طول المحور x (انظر الشكل ٢ ـ ٤) . إن كلاً منهما يمكن أن يُعتبر مرتبطاً ساكناً في مرجع مقارنة يستطيع أن يقيس المسافات فيه . الراصد A يقيس المسافات x عن مبدأ الإحداثيات في مرجعه (المرموز له بـ S) ، بينما يقيس B المسافات x عن مبدأ



(*) أي في سرعة انسياب الزمن فيها . «المترجم» .

الإحداثيات في مرجعه (المرموز له بـ S) . من الواضح أن x وx' مختلفان إلا في لحظة انطباق S وS' التي نتخذها اصطلاحاً بدء الزمن ، $t = 0$ ، وهذا لاينتقص من عمومية المسألة .
وبعد فترة زمنية t يمكن أن نتوقع أن x و x' يصبحان مرتبطين بالعلاقة :

$$x = x' + vt \qquad (٢-١)$$

لأننا يجب أن نضيف لـ x' المسافة vt التي يسيرها المرجع S' بالنسبة لـ S أثناء الفترة t .
إن المعادلة (٢ ـ ١) هي العلاقة الصحيحة في فيزياء نيوتن . ولكن يجب أن نأخذ بعين الاعتبار حقيقة أن الزمن t كما يقيسه A على ميقاتيته الخاصة قد لايطابق الزمن ، الذي نرمز له بـ t' ، كما يقيسه B على ميقاتيته الخاصة ، وذلك بسبب نسبية التزامن . كما أن المعادلة (٢ ـ ١) قد لاتتفق مع مبدأ أن سرعة الضوء واحدة بالنسبة لـ A و B كليهما . وإن أبسط تعميم لـ (٢ ـ ١) يتيح الانسجام مع هذين الواقعين هو :

$$x = \gamma(x' + vt') \qquad (٢-٢)$$

حيث γ مضروب يقترب من الواحد عندما تكون v صغيرة جداً ، لأننا نعلم أن المعادلة (٢ ـ ٢) يجب أن تؤول الى المعادلة (٢ ـ ١) الصحيحة من أجل سرعة صغيرة v ، طالما أن فيزياء نيوتن تضمن توصيفاً جيداً لفيزياء الجمل التي نصادفها في (الحياة اليومية) .
والآن ، وبسبب نسبية كل الحركات العطالية ، لابد من أن تكون العلاقة (٢ ـ ٢) متناظرة بين S و S' ، لأننا نستطيع أيضاً أن نعتبر S' ساكناً و S متحركاً نحو اليسار بالسرعة $-v$. فمن وجهة نظر B لابد إذن أن يكون :

$$x' = \gamma(x - vt) \qquad (٢-٣)$$

حيث إشارة الناقص قبل v تعبر عن أن الحركة تحدث نحو اليسار .
والآن نستطيع أن نضطلع بجعل المعادلتين (٢ ـ ٢) و (٢ ـ ٣) متفقتين مع ضرورة أن تكون سرعة الضوء ، التي نرمز لها بـ c ، واحدة بالنسبة لـ A و B كليهما . يمكن أن

نعبر عن هذا الأمر بأن نقول بأن $x = ct$. فاذا حملنا قيمتي x و x' هاتين في (٢ ـ ٢) و (٢ ـ ٣) نجد المعادلتين :

$$ct = \gamma t'(c+v), \qquad ct' = \gamma t(c-v)$$

اللتين إذا اسقطنا بالحل t و t' منهما تعطيان قيمة :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{(1-v^2/c^2)}} \qquad (٢ - ٤)$$

حيث نرى أن γ تقترب فعلاً من الواحد عندما تقترب v من الصفر . ولنلاحظ أن $x = ct$ تتضمن ، في معادلة نيوتن (٢ ـ ١) ، أن

$$x' = (c-v)t$$

فتقود الى أن سرعة الضوء بالنسبة لـ B في فيزياء نيوتن ، تساوي ($c-v$) بدلاً من c في نظرية النسبية .

ولكي نفهم معنى المضروب γ في قياس الفترات الزمنية من قبل A و B ، ماعلينا سوى أن نسقط x' بحل المعادلتين (٢ ـ ٢) و (٢ ـ ٣) لنجد العلاقة

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \qquad (٢ - ٥)$$

التي تربط الزمن t' كما يقيسه B ، بالزمن t كما يقيسه A في النقطة x . فمن أجل حادثين مثبتين في نقطتين معينتين من المرجع S ، لاتتغير x ، وهذا يعني أن الفترة الزمنية بين حادثين 1 و 2 ، كما يقيسها B ، ولنقل $t'_2-t'_1$ ترتبط بالفترة بينهما ، t_2-t_1 كما يقيسها A ، وكل على ميقاتيته الخاصة به ، بالعلاقة :

$$t'_2 - t'_1 = \gamma(t_2 - t_1)$$

التي يمكن أن نكتبها على الشكل الموجز

$$\Delta t' = \gamma \Delta t = \frac{\Delta t}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}} \qquad (٢ - ٦)$$

حيث ترمز $\Delta t'$ و Δt الى الفترتين المذكورتين على الترتيب نفسه .

واضح في المعادلة (٢ ـ ٦) أن الفترتين Δt و $\Delta t'$ ليستا متساويتين إلا إذا كان $v=0$ وهذا يعني أن الحركة النسبية بين الراصدين A و B تجعلها يجدان قيمتين مختلفتين للفترة الزمنية بين الحادثين . ونرى أن هذا الاختلاف ، الكامن في γ ، صغير جداً من أجل السرع v التي نصادفها في الحياة اليومية لأنها صغيرة جداً بالنسبة لسرعة الضوء c ، إذ تكون عندئذ النسبة v/c تافهة القيمة . فحتى الصاروخ مثلاً ، وهو يسير بسرعة ٠٠٠ ٥٠ كيلو متر/ ساعة ، لاتتعدى النسبة v/c من أجله القيمة ٠٠٠٠٥ر٠ و γ القيمة ٠٠١ ٠٠٠ ٠٠٠ ر١ . وهذا يعني أن الانسان الذي يغادر الأرض ، داخل صاروخ يندفع بسرعة ٠٠٠ ٥٠ كيلو متر في الساعة،سيرى أن الفترات الزمنية على الأرض أطول بمعدل ٠٠١ ٠٠٠ ٠٠٠ ر٠٪ منها على الميقاتية التي ترافقه ضمن الصاروخ .

وهناك طريقة أخرى للتعبير عن هذا الأمر بلغة سرعة انسياب الزمن على الميقاتيات . إن الميقاتية المحمولة ضمن الصاروخ السريع ترى من الأرض مقصِّرة عن الميقاتية الموجودة على الأرض ومن المهم أن نفهم أن هذا المفعول هو من خصائص المكان والزمان ولا علاقة له البتة بآلية عمل الميقاتية نفسها . ولايجب أن يظن المسافر مع الميقاتية في الصاروخ أن في ميقاتيته أي شيء غير عادي . فقياس الفترات الزمنية ، سواء بواسطة الميقاتية أو المخ أو أية وسيلة أخرى، سيكون عادياً متماسكاً دون شذوذ ، وما علينا سوى أن نتذكر أن الأرض نفسها متحركة في الواقع بسرعة عظيمة بالنسبة للمجرات البعيدة دون أن تولِّد هذه الحركة أي أثر زمني شاذ. ونظرية النسبية، التي تتنبأ بتقصير الميقاتيات، تستند على نسبية الحركة المنتظمة ، ولا يمكن للفحص الداخلي للميقاتيات ، أو لأية وسيلة أخرى ، أن يتيح معرفة فيما إذا كان المرجع متحركاً أو لا (تذكر أنه لايوجد حركة منتظمة مطلقة) . وإن مفعول الميقاتية هذا ، الذي يقال عنه عادة إنه تمدد الزمن ، لايتجلى للراصد إلا عندما

يرصد المراجع الأخرى التي هو في حالة حركة بالنسبة لها . فالراصد الموجود في الصاروخ يرى أن الميقاتية المرتبطة بالأرض هي التي تقصرٌ لاميقاتية ، كما أن الراصد على الأرض ، بسبب التناظر اللاصق بنسبية الحركة المنتظمة ، يرى أن ميقاتية الصاروخ هي التي تقصر بالنسبة لميقاتيته الخاصة السليمة . ونرى بفحص المعادلة (٢ ـ ٦) إن اقتراب v من c يجعل قيمة γ تتعاظم باستمرار ، وعندئذ تبدو الفترة الزمنية ، Δt ، للراصد المتحرك مستغرقة زمناً شبه أبدي .

وفي النهاية ، عندما تصبح $c = v$، تصبح γ لانهائية القيمة ، وهذا يعني أن الراصد المسافر بسرعة الضوء سيرى كل الميقاتيات متوقفة عن العمل سرمدياً ـ أي أن الزمن سيتوقف عن الجريان . ولهذا السبب يقال أحياناً إن الحزمة الضوئية لا تحس بالزمن بتاتاً مهما طالت المسافة التي عليها أن تقطعها .

٢ ـ ٣ «مفارقة» التوأمين .

إن الغرابة الظاهرية المتمثلة في تقصير الميقاتيتين كليهما ، إحداهما منظورة من مرجع الأخرى ، تسبب أحياناً شيئاً من التشويش في ذهن القارىء اللا متمرس . إذ يجب أن لا نتصور أن تمدد الزمن وهم ناجم عن انتشار الاشارة الضوئية أو شيء آخر من هذا القبيل . فليس الأمر مجرد رؤية تظهر لكل راصد أن الميقاتية الآخرى تقصرٌ ، بل إنها تقصرٌ فعلاً ـ إنه مفعول فيزيائي حقيقي . وهناك وسيلة مثيرة لتوضيحه تقضي بايجاد توأمين متماثلين تماماً يشتركان في تجربة تتطلب أن يغادر أحدهما الأرض في صاروخ يسافر ، بسرعة قريبة من سرعة الضوء ، إلى أقرب نجم (في مجموعة قنطورس) ويعود منه فوراً . تستغرق هذه الرحلة بتمامها على ميقاتية التوأم الأرضي عدة سنوات ، لكن التوأم الصاروخي يستطيع أن يجعل زمن هذه الرحلة قصيراً بقدر ما يريد وذلك بتقريب سرعة الصاروخ من سرعة الضوء . وبذلك سيعود التوأم الرحالة الى الأرض وهو أكثر شباباً من أخيه المقيم بعدة سنوات ، لأنه لا يكون قد عاش سوى مدة سفر قصيرة مقابل عدة سنوات عاشها أخوه من زمن الأرض .

إن من الساحر حقاً أن تتيح نظرية النسبية الخاصة فرصة السفر في الزمان . والواقع أن بامكان أي امرىء ، عندما تتوفر الامكانيات لقذف الصاروخ بسرعة قريبة من سرعة

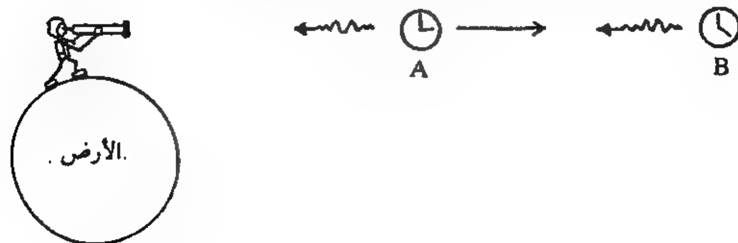
الضوء ، أن يسافر فيه عبر المستقبل دون حدود ، ومن الممتع أن يكسب المسافرون ، الذين يستقلون القطار الى مواقع أعمالهم (أثناء حياتهم كلها) ، قرابة ١٠-٧ ثانية في مستقبل مواطنيهم القاعدين في بيوتهم ، لمجرد تزايد سرعة القطار في الذهاب والاياب . بيد أن من المستحيل استغلال تمدد الزمن للسفر عبر ماضي الزمان . فالكسب الزماني النسبوي وحيد الاتجاه : نحو المستقبل .

وعند هذه المرحلة قد يصاب القارىء بالحيرة أمام مانقوله من أن التوأم المسافر يرى الميقاتية الأرضية مقصرة وأنه ، مع ذلك ، يرى لدى عودته أن أخاه الأرضي قد شاخ أكثر منه (بدلاً من أقل منه) . لقد كان هذا التناقض الظاهري سبباً في حيرة الطلاب أمام نظرية النسبية وفي استعمال جملة «مفارقة التوأمين» . إنها في الحقيقة ليست مفارقة بالمرة ، ويمكن أن نفهمها بعد فحص عميق لما يراه كل من الراصدين فعلاً . إن كلا منهما سيشاهد (حرفياً) الآخر بفضل إشارات ضوئية ذاهبة ـ عائدة بينهما . فإذا كانا مفصولين بمسافة كبيرة فإن تأخيراً كبيراً سيطرأ على استقبال هذه الاشارات بسبب المدة التي يحتاجها الضوء لقطع هذه المسافة . ولاعطاء فكرة عن هذا التأخير نذكر أن الضوء يستغرق قرابة ١٫٣ ثانية كي يقطع المسافة بين الأرض والقمر وقرابة ٨٫٥ ثانية بين الأرض والشمس ، لكنه يحتاج الى أكثر بقليل من أربعين سنة بين الأرض وأقرب نجم إليها ، وهذا النجم يبعد عنها بمسافة ٤٠ مليون مليون كيلو متر ، بيد أن من الأنسب أن نقول إنه يبعد عنها بمسافة ٤٠ سنة ضوئية وهذا يعني أننا عندما نرصد هذا النجم نراه اليوم في الحالة التي كان فيها منذ ٤٠ سنة ، لا كما هو اليوم . كما أن السكان الافتراضيين لكوكب يدور حول هذا النجم يرون شمسنا اليوم كما كانت قبل ٤٠ سنة . (لاحظ أننا قد اعتمدنا هنا على حاضر تشترك فيه الأرض والنجم الأقرب ، ورغم علمنا أن هذا الاشتراك مشكوك فيه بموجب نسبية التزامن . لكن هذه المغالطة يمكن إهمالها بسبب صغر السرعة النسبية بين الأرض والنجم) . إن تأثير هذا التأخير الزمني يتجلى في توليد فرق في تزامل سير (دوران عقارب) الميقاتيتين اللتين يحملهما الراصدان المتباعدان . لكن معدلي سير الميقاتيتين (سرعة دوران العقارب) لايتأثران اذا كانت الميقاتيتان في حالة سكون ، احداهما بالنسبة للأخرى .

لنفترض الآن أن الراصيدين يتباعدان . فمع تزايد المسافة يتزايد اختلاف التزامل

بين ميقاتيتيهما ، أي أن كلاً منهما تتأخر في تأشيراتها عن الأخرى . وهذا التأخر عن التزامل يجعل كلا من الميقاتيتين تبدو للراصد الآخر وكأنها ذات تقصير متزايد . إن هذا المفعول الجديد ينضاف الى مفعول تمدد الزمن ولكنه ، كما نرى ، ذو منشأ مختلف جذرياً . فلو كانت الميقاتيتان تتقاربان ، بدل أن تتباعدا ، فإن هذا المفعول الجديد يعمل في الاتجاه المعاكس فتبدو الميقاتيتان مسبِّقتين . لكن مفعول تمدد الزمن ينشأ عن نظرية النسبية الخاصة حصراً مهما كان اتجاه الحركة النسبية للراصدين ، بينما المفعول الآخر يحدث لكل حركة موجية ويتغير اتجاهه بتغير اتجاه الحركة النسبية ، وهو ، في حالة الأمواج الصوتية مثلاً ، يتجلى في تغير حدة الصفير الذي يصدره قطار يقترب من إنسان فيمر به ثم يبتعد عنه ، وهذا مايسمى عادة مفعول دوبلر (باسم الفيزيائي النمساوي كريستيان دوبلر C.Doppler ١٨٠٣ ـ ١٨٥٣) ويؤدي الى تغير تواتر الموجة (إن من المفيد غالباً أن ننظر الى الاهتزازات الموجية المنتظمة وكأنها دقات ميقاتية) . ففي حالة الأمواج الضوئية يتجلى تغير التواتر ، عندما يبتعد منبع الضوء ، بتغير لون الضوء ـ بما يسمى انزياح طيف الضوء نحو الأحمر ، ولهذا السبب يطلق غالباً على مفعول دوبلر الضوئي اسم الانزياح نحو الأحمر ، وهو الشيء

شكل ٢ ـ ٥ . مفعول دوبلر . الميقاتية البعيدة تبتعد عن الأرض . وهي في الساعة الثالثة تقع في النقطة A على بعد مليون كيلو متر . لكن الراصد لايرى هذا الحدث إلا بعد خمس ثوان ، وهي المدة التي يستغرقها الضوء للوصول من A إليه . وبعد ساعة واحدة تصل الميقاتية الى B ، على مسافة مليوني كيلو متر من الأرض . لكن الراصد لا يرى تأشيرها على الساعة الرابعة إلا بعد ١٠ ثوان من وصولها الى B ، لأنها على بعد مضاعف . وبذلك يبدو للراصد الأرضي أن الميقاتية تقصر بمقدار خمس ثوان في الساعة . ولو كانت الميقاتية تقترب منه لوجد أنها تسبِّق بمقدار خمس ثوان في الساعة (بالنسبة لميقاتيته في الحالتين طبعاً) .



الذي يستغله الفلكيون لاستقاء معلومات عن حركة الأجرام السماوية البعيدة .

الواقع أن الرصد العملي ، فيما بين المرجعين المتحركين ، يتأثر عموماً بكلا المفعولين معاً : دوبلر وتمدد الزمن النسبوي . ومفعول دوبلر ينعدم إذا كانت الحركة النسبية عرضانية ، أي عمودية على خط النظر لا موازية له . على أن استعمال كلمة «يرى» في توصيف الرصد المتبادل بين المرجعين وفي غالبية المناقشات التي تتناول تمدد الزمن ، يتضمن إهمال ماينجم عن مفعول دوبلر ويحدو بالقارىء لأن يعتبره مقتصراً على الحركة العرضانية . لكن المفعولين موجودان كليهما في تجربة الرحلة المغلقة(أي رحلة الذهاب والأياب معاً) التي يقوم بها أحد التوأمين .

ولايضاح كل هذه المعلومات نعمد الآن الى تحليل مفصل لما يرى كل توأم على حدة أثناء الرحلة المغلقة ، آخذين بعين الاعتبار كلا المفعولين : دوبلر وتمدد الزمن . ولتحديد كل ذلك نفترض أن التوأم A يسافر الى نجم يبعد عن الأرض بمسافة ١٠ سنوات ضوئية وبسرعة ثابتة تساوي $v = 0{,}9c$ أي ٩٠٪ من سرعة الضوء ، ثم يعود فوراً الى الأرض بالسرعة نفسها . وسنهمل مدتي التسارع والتباطؤ اللتين لابد أن يعانيهما ليبلغ هذه السرعة الهائلة ، وهما مدتان يمكن مبدئياً تقصيرهما بقدر مانريد . وأثناء هذه الرحلة المغلقة كلها يبقى B على الأرض راصداً لـ A ولميقاتيته وهما يبتعدان ثم يقتربان .

إن استعمال دستور تمدد الزمن (٢ ـ ٦) يدل على أن كلاً من التوأمين سيلاحظ أن ميقاتية الآخر تقصرُ بمعدل ٢ر٣ عن ميقاتيته ، وذلك دون أخذ مفعول دوبلر في الحسبان .

فبسرعة 0,9c يقطع A مسافة ١٠ سنوات ضوئية في ١٠ ÷ ٩ر٠ = ١ر١١ سنة أرضية يقيسها B على ميقاتيته الخاصة ؛ لكن ميقاتيه A ستشير ، لدى وصوله الى النجم وبسبب تمدد الزمن ، الى ١ر١١ ÷ ٣ر٢ = ٨٤ر٤ سنة صاروخية . لكن B لن يعلم بوصول A الى النجم الا بعد ١٠ سنوات من هذا الوصول ، وهي المدة التي تستغرقها لتبلغ الأرض الاشارة الضوئية التي تحمل خبر ذلك الوصول . وبنتيجة ذلك كله سيرى B أن رحلة الذهاب قد استغرقت عملياً على ميقاتيته ١ر١١ + ١٠ = ١ر٢١ سنة أرضية . وبما أن ميقاتية A لم تسجل ، لزمن الذهاب هذا ، سوى ٨٤ر٤ سنة صاروخية فإن B سيلاحظ أن ميقاتية أخيه تقصر عملياً أثناء الذهاب بمعدل ١ر٢١ ÷ ٨٤ر٤ = ٣٦ر٤ ، منها ٣ر٢ بسبب

تمدد الزمن النسبوي والباقي بسبب مفعول دوبلر .

ولمعرفة ما يلاحظه A ، عن B وميقاتيته أثناء الذهاب ، تذكر أن الرصدين يجب أن يكونا متناظرين تماماً بين الراصدين المطاليين بموجب مبدأ النسبية الخاصة الذي يقودنا الى أن ننظر الى هذا الأمر النظرة نفسها عندما نعتبر A ساكناً و B مبتعداً عنه بالسرعة 0,9c . فيكون بنتيجة ذلك أن A سيرى الحوادث على الأرض أبطأ زمنياً بمعدل ٤٫٣٦ (منها ٢٫٣ أيضاً بسبب تمدد الزمن النسبوي) . ولما كان A يصل الى النجم بعد ٤٫٨٤ سنة صاروخية على ميقاتيته (لاحظ أن A و B متفقان على تأشيرة ميقاتية الصاروخ لحظة الوصول إلى النجم) فانه ، عندما ينظر الى الأرض لحظة وصوله الى النجم ، لن يلحظ من الحوادث التي تقع عليها سوى تلك التي حدثت بعد انطلاقه من الأرض بـ ٤٫٨٤ ÷ ٤٫٣٦ =١٫١ سنة .

وفي رحلة الاياب يتقارب الراصدان بسرعة 0,9c وتقصر كل ميقاتية بالنسبة للأخرى ، وبسبب تمدد الزمن النسبوي ، بالمعدل نفسه ٢٫٣ ، الذي كان حاصلاً أثناء الذهاب ، لكن مفعول دوبلر سيتدارك بالتسبيق التقصير الميقاتي الذي كان يحدث قبلئذ . وبما أن الرحلة المغلقة كلها (ذهاباً وإياباً) تستغرق ١١٫١×٢ = ٢٢٫٢ سنة أرضية (على ميقاتية B ، لأن مدة الذهاب تساوي دوماً مدة الأياب ، وهي ١١٫١ سنة أرضية و ٤٫٨٤ سنة صاروخية) وبما أن B قد رأى الوصول الى النجم يحدث على ميقاتيته بعد ٢١٫١ ساعة فإنه سيرى عليها أن رحلة الاياب قد استغرقت ٢٢٫٢ ـ ٢١٫١ = ١٫١ سنة فقط . أما فيما يخص A فان رحلة الاياب تستغرق على ميقاتيته ٤٫٨٤ سنة صاروخية يراها B مضغوطة الى ١٫١ سنة أرضية ، أي أن الحوادث التي تحدث في الصاروخ أثناء الاياب تظهر عملياً لـ B متسرعة بمعدل ٤٫٨٤ ÷ ١٫١ = ٤٫٣٦ . أما بخصوص A الذي ، في بدء إيابه ، لايلحظ من حوادث الأرض سوى تلك التي حدثت بعد انطلاقة منها بـ ١٫١ سنة ، فيجب منطقياً أن يرى الـ ٢١٫١ سنة أرضية المتبقية لايابه متقلصة إلى ٤٫٨٤ سنة صاروخية تسجلها ميقاتيته الخاصة : وهذا يقابل تسرعاً زمنياً للحوادث الأرضية ، كما يراها A ، بمعدل ٢١٫١ ÷ ٤٫٨٤ = ٤٫٣٦ أيضاً . فلا فرق إذن بين A و B من جهة تسرع الحوادث كما يراها كل منهما لدى الآخر ، أي أن التناظر بينهما يبقى قائماً طوال مدة الرحلة .

يمكن أن نرى أن A يعود إلى الأرض بعد انطلاقه منها بـ ٩٫٧ سنة صاروخية تقريباً ،

فيجد أن ٢٢٫٢ سنة أرضية قد انقضت وأن أخاه التوأم قد شاخ أكثر منه بـ ١٢٫٥ سنة تقريباً . وقد كانت الأرصاد متماثلة بين A و B أثناء مراحل الرحلة كلها . فلا مفارقة إذن . وتمدد الزمن واقع حقيقي ، وليس مجرد وهم رؤيوي تسببه الاشارات الضوئية . أما سبب أن يشيخ B أكثر من A فنستطيع عزوه إلى واقع أن A هو الذي يتغير مرجع مقارنته أثناء تسارعه الى أن تبلغ سرعته القيمة 0,9c ثم ينعكس اتجاه حركته فجأة عند النجم . وهكذا ، ورغم أن المفعولين الزمنيين متناظران بين A و B أثناء فترتي السرعة المنتظمة ، فإن الرحلة بمجموعها ليست متناظرة لديهما بسبب فترات التسارع والتباطؤ المفاجئة التي يعانيها A وحده . ونذكّر هنا أن التسارع مطلق في نظرية النسبية ويمكن أن يكتشفه A من جراء معاناته لقوة تجره في صاروخه إلى الخلف أو إلى الأمام أثناء التسارع أو التباطؤ ، بينما لا يعاني B أي قوة من هذا القبيل وهو ساكن على الأرض . والانعكاس المفاجىء لسرعة A يعني ، برغم كون تسرع الميقاتيتين وإبطائهما مساوياً ٤٫٣٦ بالنسبة للراصدين A و B كليهما ، أن A يرى التسرع يحدث أثناء نصف رحلته بينما لايراه B يحدث الا أثناء ١٫١ سنة من أصل ٢٢٫٢ سنة ، مدة الرحلة كلها . وليس للميقاتيتين دخل في أعماق هذا الأمر . وللقارىء الذي اربكته هذه المناقشة أن يستعين بالجدول ٢ ـ ١ .

الجدول ٢ ـ ١ . حل « مفارقة » التوأمين . فرق بين A (في الصاروخ) و B (باق على الأرض) في المدد بالسنوات في رحلتي الذهاب والإياب ، كما تقرأ عملياً على الميقاتيتين . إن الرحلة المغلقة كلها تستغرق ٢٢٫٢ سنة أرضية و ٩٫٧ سنة صاروخية .

	رحلة الذهاب		رحلة الإياب	
	الميقاتية الأرضية	الميقاتية الصاروخية	الميقاتية الأرضية	الميقاتية الصاروخية
A	١٫١	٤٫٨٤	٢١٫١	٤٫٨٤
B	٢١٫١	٤٫٨٤	١٫١	٤٫٨٤

نستطيع أن نستغل تجربة التوأمين لتوضيح نتيجة مثيرة أخرى لنظرية النسبية الخاصة . إن A يسافر بالسرعة 0,9c بالنسبة للأرض ، لكنه يقطع المسافة بينها وبين النجم

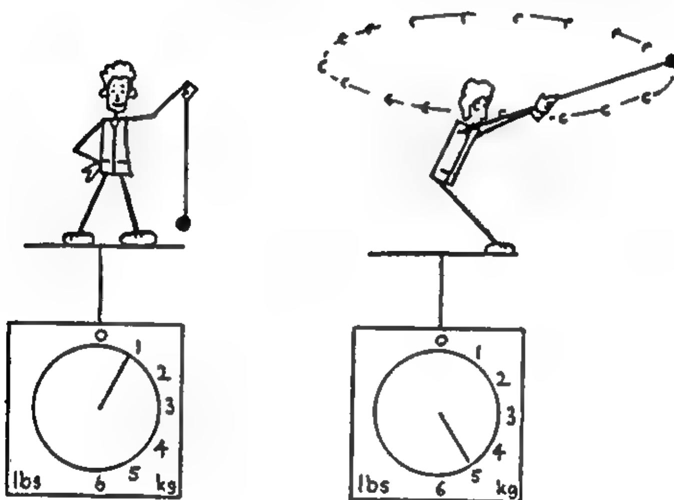
في ٤٫٨٤ سنة صاروخية . فهذه المسافة لابد أن تظهر لـ A مساوية ٠٫٩ × ٤٫٨٤ = ٤٫٣٦ سنة ضوئية بدلاً من ١٠ سنوات ضوئية بالنسبة لـ B . فالمسافة المكانية قد تقلصت إذن بمعدل تمدد الزمن ، أي بالمعدل $\sqrt{1-v^2/c^2}$ نفسه . وهذا التقلص الطولي معروف باسم تقلص لورنتس ـ فيتزجيرالد ، (H. Lorentz ، ألماني ، ١٨٥٣ ـ ١٩٢٨ . G. Fitzgerald ، إرلندي ، ١٨٥١ ـ ١٩٠١) ؛ وهو تناظري تماماً بين الراصدين المتحركين بانتظام (ومرة أخرى نرى أن رؤية A ، للأطوال الساكنة عند B ، أقصر مما يراها B ناجمة عن أن النجم مفترض ساكناً بالنسبة للأرض ، لا بالنسبة للصاروخ) . وهو يقضي بأن الراصد المتحرك بانتظام يظهر للآخرين رقيقاً في منحى الحركة . ويجب أن لا نظن أن هذا الترقق ناجم عن قوة فيزيائية تضغط على الراصد ، بل هو ، كتمدد الزمن ، خاصية فيزيائية من خصائص الفضاء نفسه ؛ ذلك أن الراصد لا يحس ولا يرى أي شيء غير عادي في مرجعه الخاص ، لكنه بدلاً من ذلك يرى كل ما في العالم المحيط به ، والمتحرك بالاتجاه والمعاكس ، متقلصاً أيضاً في منحى الحركة . لاحظ أخيراً أن كل الأشياء تظهر ، للمتحرك بسرعة v قريبة جداً من سرعة الضوء c ، رقائق ذات ثخن جد صغير في منحى الحركة !

٢ ـ ٤ أسرع من الضوء ؟

يمكن أن نتساءل عما يحدث لشيء نسرّعه حتى تتجاوز سرعته سرعة الضوء . إن التقلص النهائي لطوله وتمدد الزمن اللانهائي ، اللذين يحدثان عندما v = c ، يدعوان إلى توقع وجود حد علوي لسرعته يحول بينه وبين بلوغ سرعة تفوق سرعة الضوء . إن هذا التوقع واقع . وطبيعة هذا الحاجز الفيزيائي الحائل دون تجاوز هذه السرعة الحدية تتجلى عندما نطبق نظرية النسبية الخاصة على الأجسام المتحركة بطاقة عظيمة . ذلك أن هذه النظرية تتضمن أن اقتراب الجسم من سرعة الضوء يتطلب طاقة تسريع متعاظمة دون حدود ، ولابد من طاقة لا نهائية الكبر كي يبلغ الجسم سرعة الضوء . واكتساب هذه الطاقة المتعاظمة ، التي لا تستطيع أن « تثقب جدار الضوء » ، يتجلى على شكل تزايد مطّرد في عطالة الجسم عندما نجبره على الحركة بسرعة متزايدة . ففي حالة الصاروخ مثلاً ، وبدلاً

من أن تتحول طاقة وقوده إلى حركة أسرع ، تتحول إلى تزايد في كتلة الصاروخ وحمولته . وعندها يصبح الصاروخ « أثقل فأثقل » وتصبح عملية تسريعه أصعب فأصعب .

شكل ٢ ـ ٦ . الكتل المتحركة تصبح أثقل . عندما تقترب الكتلة الدوارة من سرعة الضوء فان ثقلها يتزايد باطراد ودون حدود . إن تسريعها يصبح أصعب فأصعب . وفي نهاية الأمر تعجز كل طاقة العالم عن تحريكها بسرعة الضوء . إن هذا معروف تماماً في التجارب المخبرية حيث الكتل الدائرة جسيمات ذرية دقيقة والرجل القوي الذي يدوّرها يسمى سكلُترون . إن الجسيمات المتحركة تصبح أثقل بالفعل . لاحظ تأشيرتي الميزان .



يستطيع المرء بالطبع أن يتخيل تجارب أكثر ذكاءً يحاول فيها تجاوز سرعة الضوء . كأن يتخيل صاروخين يتحركان كلاهما بسرعة 0,9c بالنسبة للأرض ولكن في اتجاهين متعاكسين ؛ ويأمل أن تكون عندئذ سرعة كل من الصاروخين بالنسبة للآخر مساوية 1,8c لكن ، مع الأسف ، نظرة واحدة إلى المعادلتين (٢ ـ ٣) و (٢ ـ ٥) تفاجئه بصورة جديدة . إن إضافة 0,9c إلى 0,9c تعطي ، في علم الحساب ، 1,8c ؛ لكن هذا المجموع

يساوي ، في نظرية النسبية ، 0,995c ! وهذا معناه أن تدخُّل تمدد الزمن وتقلص الطول يقضي بأن لا يجد كل من الراصدين ، عند قياس سرعة الصاروخ الأخر ، سوى 0,995c ، لا 1,8c . وفوق ذلك ، لو أطلق كل من الصاروخين في اتجاه حركته صاروخاً صغيراً آخر بسرعة 0,9c فان سرعة كل من الصاروخين الصغيرين الجديدين بالنسبة للآخر لن تتجاوز سرعة الضوء .

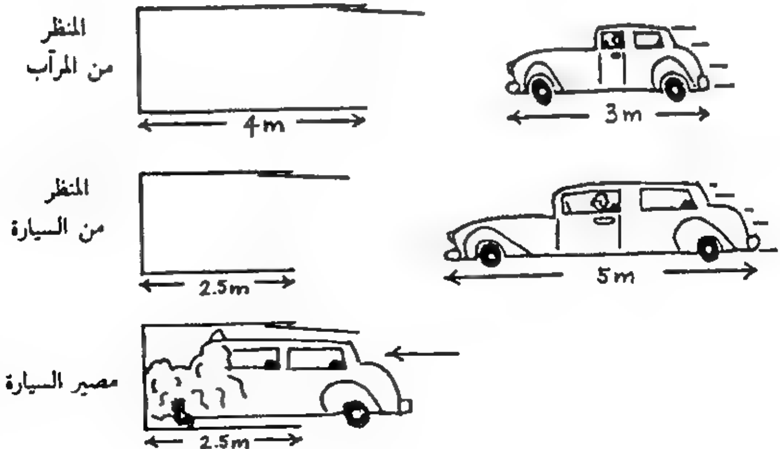
ولهذه الأسباب يقال غالباً أن لا شيء يستطيع أن يسافر بأسرع من الضوء . إن هذا ليس صحيحاً بمطلق العبارة . فالأجسام المادية فقط عاجزة عن اختراق « جدار الضوء » بالتسريع . ولا يوجد سبب معروف لعدم إمكانية وجود كائنات أسرع من الضوء ، إذا اشترطنا عليها أن تكون دوماً أسرع من الضوء ، أي إذا كان من غير الممكن إبطاؤها إلى أقل من سرعة الضوء . وقد جرى بالفعل بحث نشيط عن مثل هذه الكائنات (على شكل جسيمات مجهرية) من قبل فيزيائيين تجريبيين في العقد الأخير أو نحوه . حتى أنها قد منحت اسماً ـ التاخيونات Tachyons . ولم يمكن حتى الآن العثور على تاخيون واحد . ولو وجدت يوماً ما ، فمن المتوقع أن كل ما تفعله هو أن تتفاعل مع المادة العادية بطريقة لا يمكن ضبطها ، وإلاّ فيمكن إستخدامها في المواصلات الاخبارية . وسيكون ذلك سبباً لمفارقة تبدو غير قابلة للحل . إذ يُبرهن في نظرية النسبية على أن التاخيونات يمكنها أن تصعد سلّم الزمان نحو الماضي بحيث يسهُل استعمالُها ، كوسيلة إخبارية ، الإتصال بالماضي . وعندئذ سيتمكن المرء من صنع شرك ملغوم غبي يدمر نفسه بواسطة إشارة مرموزة مرسلة عبر ماضية ، مما يمنع كل إمكانية لإرسال الإشارة أولاً ـ إنها مفارقة مكشوفة !

وبصرف النظر عن التاخيونات يمكن أن نعبر عن طبيعة جدار الضوء بقولنا : لا يمكن لأي تأثير فيزيائي ان ينتقل بأسرع من الضوء . ينتج من ذلك أن من المستحيل صنع جسم صلب حقاً . ويمكن إظهار ذلك في « مفارقة » مسلية تتجلى عند رجل يملك سيارة طولها خمسة أمتار ومرآباً طوله أربعة أمتار . إنه ، كفيزيائي ، يعلم أنه لو قاد سيارته بسرعة كافية داخل المرآب فان طولها (بالنسبة للمرآب) يمكن أن يصبح أقل من أربعة أمتار بفضل تقلص الأطوال النسبوي المشروح في الفقرة السابقة . فلو أسرع بسيارته ، نحو المرآب ، حتى يبلغ السرعة 0,8c فان طول السيارة سيُرى من المرجع ـ المرآب أقصر من

أربعة أمتار . وبمجرد أن تصبح السيارة كلها داخل المرآب ينغلق بابه آلياً ويمسك بالسيارة !

فمن وجهة نظر السائق تبدو الأشياء مختلفة المنظر نوعاً ما . انه ، وهو ضمن السيارة المتحركة ، لا يلحظ في طولها شيئاً غير عادي . لكنه يلاحظ أن المرآب يبدو أمامه أقل عمقاً بشكل غير عادي - الواقع أن عمقه قد انكمش ، بالمفعول النسبوي نفسه ، إلى مترين ونصف تقريباً . وبما أن أوان التوقف قد فات يدرك السائق حماقته : إن المرآب الذي طوله أربعة أمتار لا يسع سيارة طولها خمسة أمتار . فأي الرأيين هو الصحيح : المرآب يستطيع

شكل ٢ - ٧ . مفعول تقلص الطول . إن السيارة التي طولها خمسة أمتار تُرى من المرآب متقلصة إلى ثلاثة أمتار وهي تتحرك بـ ٨٠٪ من سرعة الضوء . فالمرآب ، وعمقه أربعة أمتار ، يمكن أن يحتويها . أما من السيارة فالمرآب هو الذي يبدو متقلصاً (إلى حوالي مترين ونصف) ولا يمكن أن يحتويها . والذي سيحدث واضح في الصورة السفلية من الشكل . أي أن مؤخرة السيارة تستمر في الحركة داخل المرآب إلى أن تعلم أن الجدار قد أوقف مقدمتها : إن هذا الخبر لا يمكن أن ينتقل بأسرع من الضوء ، مما يتيح أن تنهرس السيارة ضمن المرآب إلى مترين ونصف . إن مظهري الحوادث ، كليهما ، منسجمان . ومهما كان هيكل السيارة صلباً فلا يوجد في العالم مادة يمكن أن تقاوم هذا الانهراس .



بسهولة أن يحتوى سيارة متقلصة الطول ، أم أن المرآب القصير العمق لا يمكن ان يحتوي سيارة طويلة ؟

إن كلا الصورتين ، كما هي العادة في نظرية النسبية ، صحيحة . فالحكايتان تتفقان إذا ما أخذنا بعين الإعتبار ما يحدث للسيارة الطويلة عندما تصل مقدمتها إلى نهاية المرآب . فهي ستنهرس وضوحاً على جدار النهاية (الذي يجب أن يكون شديد المقاومة) . لكن هذا الحادث الشديد العنف ، والذي يقع لدى الاقتراب من سرعة الضوء ، لا يوقف السيارة بالمعنى المعروف . فلئن كان واضحاً أن المقدمة يوقفها الجدار فجأة إلّا أن المؤخرة لا يمكن أن تعلم بهذا الخبر قبل أن تصل إليها موجة الصدم عبر طول جسم السيارة . ولما كان لا يوجد تأثير ، ولو كان موجة صدم ، يمكن أن ينتقل بأسرع من الضوء فان المؤخرة عليها أن تنتظر ١٫٧ × ١٠^{-٨}ثانية على الأقل (من زمن السيارة) لتعلم بوجود الجدار . وهي ، أثناء هذه الفترة ، تتحرك بسرعة 0,8c فتقطع مسافة أربعة أمتار . وبنتيجة ذلك كله تنضغط السيارة إلى متر واحد فقط مما يجعلها تدخل بكاملها في مرآب طوله متران ونصف !

إن الحكمة من هذه الحكاية هي أن سيارتك ، مهما كانت مادتها صلبة وعصية على الانضغاط ، ستعاني بعض الإنهراس إذا كانت قريبة من سرعة الضوء . وسنشرح ، في الفصل القادم ، كيف تؤدي إحدى نتائج هذا الإنهراس النسبوي إلى تقلص نجوم بكاملها حتى العدم .

٢ ـ ٥ المكان ـ الزمان الجديد الرباعي الأبعاد .

لقد كان رد الفعل الأولي ، لكثير من الناس ، أمام فكرتي تمدد الزمن وتقلص الطول اللتين تبدوان منافيتين للإحساس البدهي ، ينبع من رفض غريزي . فمفاهيمنا الشائعة عن المكان والزمان ، وهي متأصلة في بديهتنا وفي خبرتنا ، قد تزعزعت أسسها في نظرية النسبية . وفي مثل هذه الأحوال يلجأ المرء العادي إلى الشك .

وكجواب على هذا الشك يجب أن نذكر أولاً أن نظرية النسبية بكل أبعادها ليست حديثة تماماً . فنشرة آينشتاين الأولى تعود إلى عام ١٩٠٥ ، وقد حازت ، في ظرف سنوات قليلة ، على قبول جمهور العلماء . وغدت ، منذ ذلك التاريخ ، حجراً من الأحجار

الأساسية في بناء الفيزياء الحديثة وأصبحت مضامينها تمتد إلى أبعد من تلك المجالات التافهة فى حركة القطارات والصواريخ . فقد أمكن التأكد مباشرة من تمدد الزمن في مستوى الظواهر الذرية والفلكية معاً وذلك في الميقاتيات المرسلة لتدور حول العالم . والأهم من ذلك هو أن المبادىء الجديدة التي جلبتها نظرية النسبية راحت تفرض نفسها على كل فروع الفيزياء . فنظرية التثاقل مثلاً ، والقوانين المتحكمة في بنية الذرة وفي سلوك الجسيمات الأدق منها ، لابد أن تتفق مع أفكار آينشتاين . وعندما تؤخذ هذه الأمور بعين الإعتبار نكتشف مفاعيل جديدة ، كانزياح بعض الخطوط الطيفية الذرية التي تبدو لأول وهلة ضعيفة الصلة بالنسبية ، ونتحقق من اتفاقها مع التجربة .

إن من أكثر الأمور بروزاً ، مما توجبه نظرية النسبية ، يقتضي اعادة كتابة قوانين الميكانيك كي تنسجم معها . فقد ذكرنا ، في الفقرة ٢ ـ ٤ ، أن جدار الضوء يجعل الكتلة تتحول إلى طاقة ، مما يمنع أي جسم من تجاوز سرعة الضوء . ويمكن لهذا التحول أن يحدث في الإتجاه المعاكس . وإن كل ذلك محتوى في معادلة آينشتاين التالية التي ربما كانت أشهر علاقاته :

$$E = mc^2 \qquad (٢ - ٧)$$

إن هذه المعادلة تدل على أن كمية هائلة من الطاقة E يمكن الحصول عليها من كمية صغيرة جداً من الكتلة m ، لأن الطرف الأيمن منها يحوي مربع سرعة الضوء ، c ، وهي عدد كبير جداً . فغرام واحد فقط من المادة يمكن أن يتحول إلى ٣٠ مليون كيلو واط ساعة ـ وهذا يغذي بالطاقة بيتاً عادياً لمدة عدة سنوات . إن تحول الكتلة إلى طاقة يفسر (ما كان قبل لغزاً محيراً) منشأ الطاقة التي تشعها الشمس ، كما يحدث وبشكل مخيف في انفجار القنبلة الذرية .

وبالاضافة للشواهد التجريبية المذهلة في صالح النسبية الخاصة ، تمتلك هذه النظرية مظهراً جذاباً بسبب ما جلبته إلى الفيزياء النظرية من تناظر إضافي وتوحيد . فالصيغ الرياضية تصبح فيها أكثر أناقة عندما يُعاد سبكها وفق المبادىء الجديدة . وهذا

ناجم في معظمه عن اندماج المكان بالزمان ، هذا الاندماج الذي يتجلى من خلال النظرة المتوغلة إلى أعماق هذه النظرية .

يبرز من هذه النظرية أن النموذج النيوتني للمكان والزمان (أو المكان والزمان النيوتنيين الجديدين) يحتاج إلى تعديل لكي ينسجم مع المفاعيل الجديدة كتمدد الزمن وتقلص الطول . وبمقدورنا أن نأخذ ، عن هذه البنية الجديدة للمكان والزمان ، رؤية عميقة تتضح من الاعتبارات التالية .

لقد كان مفترضاً ، في المكان والزمان النيوتنيين ، أن الأطوال المكانية والفترات الزمانية مستقلة عن حركة الراصد الذي يقيسها . أي أن أطوال القضبان ومعدل سير الميقاتيات لا تتعلق بالحركة النسبية بينها وبين من يرصدها ويقيسها . أما نظرية النسبية فتقول بأن طول الشيء يتقلص في منحى حركته وأن الفترات الزمنية تتمدد . وقد رأينا منذ قليل ، في تجربة القطار ، أن الجسم المتحرك الذي يمتلك امتداداً في المكان يمتلك أيضاً تمدداً في الزمن ـ إن الحادثين اللذين ، في طرفي عربة القطار المتحركة ، يظهران متزامنين عند الراكب يكونان ، بالنسبة للراصد الواقف قرب السكة ، مفصولين بفترة زمنية . إن هذا يوحي بأن من الأحسن أن نعتبر أن لكل جسم امتداداً في المكان والزمان معاً . ويستطيع المرء أن يعتبر مفعولي تمدد الزمن وتقلص الطول اندماجاً في امتداد فضائي ظاهراً على شكل ازدياد في امتداد زماني . وعندها يصبح من الأنسب أن نتصور أن لكل شيء امتداداً مكانياً ـ زمانياً ثابت القيمة ، وأن مسقط هذا الامتداد في مدموج المكان والزمان معاً يضم منها نسبة متغيرة بتغير السرعة النسبية للجسم . ويمكن أن نشبه هذا الاسقاط بالاسقاط في الفضاء العادي حيث يبدو القضيب ، وهو ثابت الطول ، ذا طول أقصر على خط النظر عندما ننظر إليه وهو مائل على هذا الخط . فالطول الحقيقي l للقضيب يرتبط مع مساقطه x و y و z على محاور الإحداثيات المتعامدة بعلاقة فيثاغورس :

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2 \qquad (٢ - ٨)$$

حيث كل من هذه المساقط أصغر من طول القضيب الحقيقي .

وإذا فحصنا الآن معادلتي التحويل (٢ ـ ٢) و (٢ ـ ٥) نجد (بقليل من الإلمام بالجبر) أن المقدار $x^2 - c^2t^2$ ثابت القيمة رغم تغير x و t من راصد لآخر ؛ أي أن :

$$x^2 - c^2t^2 = x'^2 - c^2t'^2$$

ولو اعتبرنا أن الحركة تحدث في الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة ، لا على منحى x فقط ، فان الفاصل اللا متغير ، الذي نسميه s ، هو :

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 \qquad (٢ - ٩)$$

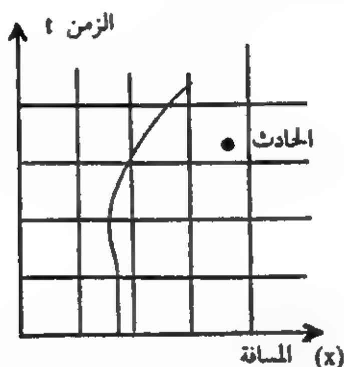
وبمقارنة (٢ ـ ٩) بـ (٢ ـ ٨) نرى فعلاً أن المسقط المكاني والمسقط الزماني يمكن أن يندمجا معاً بطريقة شبه فيثاغورية ، شرط أن نضرب الفترة الزمنية سلفاً بسرعة الضوء ، c ، مما يحولها تلقائياً إلى فاصل مكاني . ولما كانت c كبيرة جداً فان الفترة الزمنية مقدار مكاني « جدير بالاحترام » . فالثانية الزمنية الواحدة مثلاً تكافىء ، في هذا المدموج الجديد ، مسافة تساوي ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر !

إن واقع أن نستطيع ، بدمج المكان والزمان معاً وبه وحده ، أن نستنبط مقداراً s ثابتاً لا متغيراً من راصد لآخر ، لدليل يوحي بوجوب اعتبارهما متحدين في فضاء مكاني ـ زماني واحد رباعي الأبعاد . لقد نوقشت خواص هذا البناء الرباعي الأبعاد أول الأمر لدى هرمان منكوفسكي (روسي ، ١٨٦٤ ـ ١٩٠٩) . ولهذا السبب يسمى أحياناً فضاء منكوفسكي . وهو فضاء بالمعنى الرياضي لهذه الكلمة . ولا يجب أن يفهم من ذلك أن المكان رباعي الأبعاد أو أن الزمان شكل من أشكال المكان ، بل أن نظرية النسبية قد كشفت عن واقع أن خصائص المكان وخصائص الزمان متداخلة تداخلاً وثيقاً وأن صنع نموذجين منفصلين لهما أمر متعذر .

إن دمج المكان والزمان معاً يمكن أن يتم بأسلوب أقرب إلى الفهم وذلك برسم مخطط بياني مكاني ـ زماني أو خارطة . فأكثر الناس يعرفون خرائط الفضاء ذي البعدين التي تحوي خطوط طول وخطوط عرض على شاكلة ما هو مرسوم في الشكل ٢ ـ ٨ . فالخط على مثل

هذه الخارطة قد يمثل مسار طريق أو نهر . وكل نقطة من الخارطة تمثل موقع مكان على سطح الأرض . وعلى شاكلة ذلك يمكن رسم خارطة تمثل المكان ـ الزمان . ومن الواضح أن من غير الممكن رسم خارطة بأربعة أبعاد على صفيحة من الورق ولذلك سنقتصر على الزمن مضافاً إليه بعد مكاني واحد نمثله بالمحور x .

شكل ٢ ـ ٨ . خارطة المكان ـ الزمان . النقطة على هذه الخارطة تمثل حادثاً يقع في موضع وزمن معينين . أما المسار المرسوم فيمثل تاريخاً ـ أي مجموعة حوادث متوالية ، كالتواءات مسار جسيم متحرك . إن « خطوط الطول » تمثل مكاناً واحداً في كل الأزمنة ، وتمثل « خطوط العرض » لحظة واحدة في كل الأمكنة .

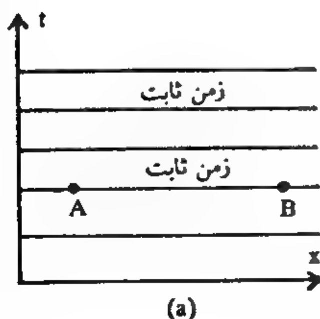


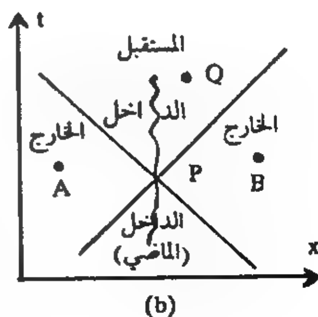
وبمنزلة خطوط للعرض يجب النظر إلى المستقيمات الأفقية وكأنها قضبان صلبة ساكنة في مرجع المقارنة المعتبر ، وكل خط هو وضع القضيب في الأزمنة المتوالية . أما المستقيمات الشاقولية (خطوط الطول) فكل منها يمثل بعداً عن طرف القضيب . وعلى هذا فان الخط المنحني ، المرسوم على خارطة المكان ـ الزمان ، هو المسار الذي يتبعه جسم متحرك بمرور الزمن . إن هذا المسار المرسوم يدل على أن النقطة كانت في البدء ساكنة في المرجع المعتبر ، ثم تحركت قليلاً إلى اليسار ثم تسارعت نحو اليمين . فالمسار يمثل إذن ، على خارطة

المكان ـ الزمان ، تاريخ الجسيم المتحرك وهو ما يسمى عادة خطه العالمي . والنقطة في هذه الخارطة هي محل الحادث ، أي مكان معين في زمان معين .

يمكن استخدام الخرائط المكانية ـ الزمانية لابراز الفروق بين نموذجي المكان والزمان لدى كل من نيوتن وآينشتاين . فنحن لا نعرف لماذا لا يندمج المكان والزمان النيوتنيان معاً في فضاء مكاني ـ زماني واحد ذي أربعة أبعاد ، اللهم إلا أن ذلك يوفر علينا مهمة البحث عن بنية فيزيائية جديدة ، وهي مهمة لا تزيد عن تمرين رياضي بسيط . إن المكان ـ الزمان النيوتني موضح في الشكل ٢ ـ ٩ (a) . إنه يتمثل بشرائح مكانية ، كل شريحة مقتطعة في زمن ثابت . فكل النقاط الواقعة على شريحة واحدة نقاط متزامنة تتناول زمناً نيوتنياً واحداً شاملاً . إن هذا التشرح الطبيعي يبرز في هذا الرسم من مجرد خياطة مصطنعة جمعنا فيها

شكل ٢ ـ ٩ . مقارنة المكان ـ الزمان بين نيوتن وآينشتاين . كل شريحة أفقية في (a) تمثل الفضاء المكاني كله ونفسه في لحظة واحدة ؛ الحادثان A و B يحدثان في زمن واحد . إن هذه الشرائح هي ، في النموذج النيوتني ، نفسها بالنسبة لكل الراصدين مهما كانت حركاتهم . أما (b) فيمثل نموذج منكسوفسكي لمكان ـ زمان اينشتاين . وقد رسمت هذه الخارطة من أجل راصد معين ذي سرعة منتظمة معينة . كل الراصدين متفقون على المسارين الضوئيين (المستقيمين المائلين) . كل تواريخ الجسيم المارة بـ P يجب أن تبقى داخل خطي الضوء . الحادثان A و B ، الواقعان في المنطقة الخارجية ، لا يتمتعان بترتيب زمني محدد ولا يمكن لأي منهما أن يؤثر سببياً في الآخر ، أو في P ، بينما الحادث Q يقع حتماً بعد P .





المكان والزمان النيوتنيين ثم فرقناهما بكل بساطة . أما مرجع المقارنة فيمكن أن يعتبر مثبتاً في فضاء مطلق (أو في الأثير إذا شئت) . وكل الراصدين ، مهما كانت الحالة الحركية لكل منهم ، متفقون على شكل هذه الخارطة ، لأنهم يستخدمون المكان نفسه والزمان نفسه .

أما فضاء منكوفسكي فهو ، على عكس ذلك ، لا يمكن تفكيكه على هذه الصورة . فليس فيه تشرُّح تلقائي إلى مقاطع مكانية في زمان ثابت ، لأن الراصدين المختلفين غير متفقين على التزامن ولا على قياس الطول . ومع ذلك فهناك نوع من التفكيك يبرز تلقائياً من نظرية النسبية ويتضح في الشكل ٢ ـ ٩ (b) . فالخطان المستقيمان المائلان هما مسارا شعاعين ضوئيين يمران بالحادث P وبالسرعة الثابتة c ، احدهما ذاهب نحو اليسار والآخر نحو اليمين . فاذا اخترنا للطول وللزمن وحدة قياس واحدة (السنتيمتر والسنتيمتر الضوئي(*) مثلاً) فان كلاً من هذين الخطين يميل بزاوية قدرها ٤٥ درجة . والمستقيمان المرموز لهما بـ x و t ، على الشكل الراهن ، لا يصحان إلاّ مرسومين في مرجع مقارنة واحد . وعندما يختلف الراصد فانه سيرسم هذين المستقيمين ، المتعلقين به ، بميل مختلف بسبب اختلاف وجهة نظره بخصوص المكان والزمان . لكن ميل خطي الضوء سوف يكون مساوياً ٤٥ درجة في كل المراجع لأن كل الراصدين يجدون في قياس سرعة الضوء قيمة واحدة . إن خطي الضوء يقسمان طبيعياً فضاء منكوفسكي إلى منطقتين ـ « داخلية » و « خارجية » (انظر شكل ٢ ـ ٩ b) . إن مسار الجسيم المادي (خط العالم الخاص به) لابد أن يقع دوماً داخل خطي الضوء لأن الجسيم يتحرك بأبطأ من الضوء . والراصدان الكائنان في حالتين حركيتين مختلفتين سيريان مسارين مختلفين لكنهما واقعان دوماً داخل خطي الضوء . وواضح على الشكل ٢ ـ ٩ أن طبيعة خطي الضوء الأزلية تثبُت كل حادث واقع داخلهما بعلاقة ماض أو بعلاقة مستقبل بالنسبة لحادث التقاطع P . بينما نرى أن ترتيب الحادثين ، الواقعين خارجهما ، بالنسبة لـ P غير ثابت . وقد أعطينا في الفقرة ٢ ـ ٢ ، لدى مناقشة تجربة القطارين السريعين ، مثالاً على انعكاس الترتيب الزمني لحادثين . على أن انعكاس الترتيب الزمني لا يعني انعكاس ترتيب السبب والمفعول (الناجم عن السبب) . فبما أن

(*) الزمن الذي يستغرقه الضوء ليقطع مسافة سنتيمتر واحد . (المترجم) .

كل التأثيرات المعروفة (الجسيمات والإشارات الضوئية و . . . التي يمكن أن تنقل التأثير) لا تنتقل إلّا بأبطأ من الضوء أو بسرعته ، فان الحوادث الواقعة خارج خطي الضوء ، والتي لا تتمتع بأي ترتيب زمني معين بالنسبة لـ P ، لا يمكن أن تؤثر في P بأية وسيلة . لكن التاخيونات ، لو كانت موجودة ، لأمكنها بالطبع السفر في المنطقة الخارجية ولانعكس بالتالي ترتيب السبب والمفعول . ومن هنا تبرز المفارقات التي تسببها التاخيونات .

إن الفرق بين الحوادث التي تقع داخل خطي الضوء وبين تلك التي تقع خارجهما ينجم عن قيمة s^2 المعطاة بالمعادلة (٢ ـ ٩) . ففي الداخل يكون الجزء الزمني c^2t^2، إنطلاقاً من p ، أكبر من الجزء المكاني x^2(أو من $x^2+y^2+z^2$ في الأبعاد الأربعة)، مما يجعل s^2 سالباً . أما في الخارج فالعكس هو الصحيح مما يجعل s^2 موجباً . وهو معدوم على طول خطي الضوء ، مما يعني أن المسافات ، في الفضاء الرباعي الأبعاد وبالنسبة للشعاع الضوئي ، معدومة مهما كان مساره في المكان طويلاً . إن هذه الصفات الخاصة للمجال s^2 ناجمة عن وجود إشارة الناقص قبل c^2t^2 في المعادلة (٢ ـ ٩) ، وهذا يعني أن المسافات ، في خريطة المكان ـ الزمان ، لا يمكن أن تقاس كما تقاس على الخرائط المكانية العادية ، لأن السلمّ يتغير بتغير ميل الخطوط . فهندسة فضاء منكوفسكي هي هندسة غير عادية بمعنى ما . فمن الممكن مثلاً للشعاع الرياضي أن يكون ، في فضاء منكوفسكي ، موازياً لنفسه أو عمودياً عليها !

وهكذا ، وبالرغم من غرابة الظواهر النسبوية ، يكاد لا يوجد اليوم فيزيائي واحد يرتاب جدياً في صحة نظرية النسبية ضمن الظروف المشروحة . ولو كانت نظرة نيوتن صحيحة بالفعل لبقي العديد من الظواهر ، التي نفهمها اليوم بكل تفاصيلها ، دون تفسير معقول . ومع ذلك بقي الشعور بمحدودية هذه النظرية قائماً لعدة سنوات بعد اكتشافها . لكن آينشتاين نشر ، عام ١٩١٥ ، مغامرة ثانية فكرية عظيمة تنبأ في نهايتها بأن النسبية الخاصة خاصة فعلاً ـ إنها اقتراب أولي من نظرية نسبوية عامة تأخذ في الحسبان آثار التثاقل . لكن هذا لا يعني أن النسبية الخاصة خطأ ، بل إنها مجرد تقريب حسابي يصح في حدود إمكانية اعتبار التثاقل مهملاً ، كما يصح ميكانيك نيوتن ، كتقريب حسابي غير خاطىء ، في حدود السرعة الصغيرة .

وبدلاً من أن تعود بنا إلى المفاهيم المريحة السائدة قبل النسبية ، تجرنا النظرية العامة الجديدة بعيداً إلى عالم نرى فيه أموراً أشد عجباً .

٣ اللا تناظر بين الماضي والمستقبل

٣ - ١ معنى اللا تناظر في الزمن .

ما هو سبب التغير في هذا العالم ؟ لماذا تبقى بعض الجمل الفيزيائية على حالها مدة طويلة أو قصيرة بينما بعضها الآخر يتحول أو يتطور أو يتفكك ؟ وما هي طبيعة التغير الأساسية ؟ إن الذرة (نواتها على الأقل) تبقى خالدة نسبياً عبر تعرضها خلال حياتها إلى تفاعلات وعلاقات مع ما يحيط بها . إن النهار والليل يتواليان في الظاهر بانتظام دون توقف . وبينما يهرم محرك السيارة ويتعطل نهائياً نرى الريح تحتّ ببطء سفوح الجبال ، والكائنات البشرية تنمو لتشيخ وتموت . لماذا تحتاج الميقاتيات الأرضية إلى تغذية كي لا تتوقف بينما الميقاتيات الفلكية ـ بأيامها وشهورها وسنواتها ـ تعمل دون مساعدة ؟

إن السعي لفهم لماذا وكيف تتغير بعض الأشياء من حولنا بينما بعضها الآخر لا يفعل ذلك ، هو فصل من أكثر الفصول في تاريخ العلم طولاً واضطراباً وإثارة للجدل . وبسبب تنوع وتعقيد الجمل الفيزيائية المحيطة بنا فان مسألة تطورها الزمني قد دُرست رئيسياً في كل فرع على حدة من الفروع التي برزت هذه المسألة فيها . ففي الترموديناميك والبيولوجيا ، كما في نظرية الإعلام والإحصاء ، وفي الميكانيك كما في الكهرباء ، عولجت هذه المسألة باستخدام الوسائل الرياضية في اللغة المعتمدة . وعندما تداخلت هذه المواضيع بعضاً في بعض بدأ الخلاف والجدل حول هذه المسألة يدب بين الممارسين لتلك المواضيع . إن جزءاً كبيراً من هذا الجدل يمكن تحاشيه إذا تم إيضاح المفاهيم المشتركة الاستعمال وفصل المسائل الفيزيائية عن المسائل الفلسفية . وربما كان القسط الأعظم من سوء التفاهم ، حول كل ما يحيط بمسألة سبب التغير مع مرور الزمن ، ناجماً عن الخلط بين الزمن الذي يدخل في قوانين الفيزياء والزمن المستحكم بالذهن البشري .

لقد قدمنا في الفصل الأول شرحاً وصفياً للفرق الإحساسي البشري بين المكان والزمان . فالمعاناة البشرية الأولية تُظهر الزمن وكأنه نشاط وحيد الاتجاه يُستشعر أحياناً

كتدفق انسيابي للزمن وأحياناً كحركة محسوسة واعية في الزمن أو خلاله . لكن معاناة المكان ليست على هذه الصورة . ورغم تطور علم الميكانيك النيوتني فان كهرباء مكسويل ونظريتي النسبية ، الخاصة والعامة ، ونظرية الكم تلح كلها ، بدرجات متفاوتة ، على التشابه البنوي بين المكان والزمان . والفيزياء النظرية لم تكتشف ، حتى الآن وفي كل مجالاتها ، أي ضرورة لزمان متحرك دافق . فعالَم النسبية يتم توصيفه بواسطة خارطة سكونية رباعية الأبعاد . وبذلك يبدو الزمن الذي يدخل في معادلات الفيزياء النظرية غنياً عن تلك الصفة الجوهرية للزمن النفساني البشري . وستفحص في الفصل السابع هذا الواقع الغريب بالتفصيل ، وسنعيد النظر في بعض الحجج التي سيقت في صالح الاقتراح المريع الذي ينزل بتدفق الزمن إلى منزلة الوهم النفساني .

على أنه ، حتى لو استبعدنا حركة الزمن النفسانية الوحيدة الإتجاه ، ما يزال يوجد تمييز بين الماضي والمستقبل . وخير وسيلة لإيضاح هذا التمييز هي اللجوء إلى تشبيه بحركة صور فيلم ما . لنفترض أننا صورنا فيلماً سينمائياً لمجموعة حوادث من « الحياة اليومية » ، كعود ثقاب يشتعل ويتحول إلى فحم نباتي ويدخن . الفيلم يتألف من مجموعة مقاطع ـ الصور هنا ـ ويمكن أن نعتبره نموذجاً فيزيائياً للعالم الواقعي . لنفترض الآن أننا فصلنا مقاطع هذا الفيلم بالمقص كلاً لوحده ، ثم خلطناها فوضوياً ثم ضممناها معاً في كُداسة واحدة صورة فوق صورة . لنطلب الآن من أحد الناس أن يفرط الكداسة ويعيد ترتيب المقاطع بالتوالي الصحيح . إن هذا الشخص سيكون قادراً ، بقليل من الصعوبة ، على إجراء الترتيب الصحيح للمقاطع ، حتى ولو لم يكن قد رأى مجموعة الحوادث الواقعية أثناء تصويرها . وسبب نجاحه هو تغير حالة العود ؛ مما يدل ، في هذه الحالة ، على وجود ترتيب صحيح بمعنى أن توالياً واحداً للمقاطع ، وواحداً فقط ، يمثل التغير الذي حصل في عالم الواقع .

لنفرض الآن أننا أجرينا تجربة مماثلة تناولت تصوير حركة نواس يتأرجح . فهنا يوجد أيضاً للمقاطع عدة تواليات غير صحيحة ، لكن هذه المرة يوجد أكثر من توال واحد ممكن يمثل وصفاً صحيحاً لعالم الواقع . فأي توال ، لحركة صور الفيلم ، يري نواساً يقوم بنوسان عادي يمثل ، ولو نُظم بترتيب معاكس (أو لو عُرض الفيلم « بالمقلوب ») ، نواساً

يقوم أيضاً بنوسان مألوف . من الواضح أن الشخص ، الذي نستخدمه في هذه التجربة ، لو كان قد شاهد الحوادث الأصلية لتمكن عموماً من الإختيار بين التواليين الممكنين (يمكن ، مثلاً ، أن يكون قد لاحظ أن النواس قد انطلق من الوضع الشاقولي نحو اليمين ، عندها يرى أن الفيلم المعروض بالمقلوب يظهر النوسة الأخيرة نحو اليسار ومتوقفة فجأة في وضع الشاقول) . لكن المهم هنا ليس معرفة فيما إذا كان التوالي المعكوس قد حدث فعلاً أم لا ، بل معرفة أنه ممكن الحدوث ، وذلك لأنه ينسجم مع قوانين الفيزياء ومع مشاهد الحياة اليومية .

إن أحد الأساليب المعتمدة للتعبير عن اختلاف نتيجتي هاتين التجربتين لدى الشخص الذي عاناهما ، يقضي بأن نقول عن تسلسل الحوادث إنه لا متناظر زمنياً في الحالة الأولى ، ومتناظر في الحالة الثانية . ومن المهم أن نلاحظ بهذه المناسبة أن كلمة «متناظر» التي نستعملها في هذا المعنى هنا ، لاتتضمن بالضرورة معنى كلمة دوري . فالجسم الذي يسقط نحو الشمس ، مثلاً ، من مسافة بعيدة في الفضاء ، ثم ينعطف حولها على مدار قريب حتى يغادرها دون رجعة ، لايقوم بحركة دورية لكن حركته متناظرة زمنياً لأنها عكوسة ، أي لو كان الجسم يتحرك في الاتجاه المعاكس على المسار نفسه لما رأينا في هذه الحركة شيئاً شاذاً،لأنها تتفق مع قوانين الفيزياء .

وبخلاف الظواهر الدورية وسواها من الظواهر المتناظرة التي لاتثير العجب عندما نرى معكوساتها ، فإن العمليات اللا متناظرة تتصف بأن معكوساتها تظهر من العجائب لناظرها . فلو رأيت عود الفحم واللهب الداخن الذي انطلق منه قد عادا يتراكبان معاً ليشكلا عود الثقاب الأولي لعددت ذلك يقيناً من المعجزات .

والآن نصل الى نقطة حاسمة . إن اللاتناظر الزمني الذي أوضحناه بواسطة حركة مجموعة المقاطع المصورة ليس خاصة من خصائص الزمان نفسه ، بل هو خاصة بنوية من خواص مجموعة المقاطع وهو أيضاً ، بسبب أن الفيلم نموذج للعالم الواقعي ، خاصة من خواص الجمل الفيزيائية الواقعية (عود الثقاب واللهب والدخان . . . في المثال المطروح) . فسبب اللا تناظر الزمني في هذا العالم يجب أن يُبحث عنه لا في بنية الزمن نفسه بل في بنية هذا العالم الذي يبدو عاجزاً إلا عن سرد لا متناظر لمقاطع الحوادث بترتيب زمني معين .

إن الفشل في تمييز خاصة اللا تناظر الزمني ـ كخاصة اتضح أنها من خواص العالم الذي نعيش فيه ـ عن تدفق (أو حركة) الزمن النفساني الذي ناقشناه سابقاً ـ كخاصة تبدو (نفسانياً) من خواص الزمن نفسه ـ قد أسهم في توليد اختلاط وسوء فهم بخصوص منشأ اللا تناظر الزمني . فالخاصة البنوية للا تناظر الزمني تنتمي الى مجموعة المقاطع الصورية المتحركة حتى عندما تكون مضمومة كداسة على طاولة جهاز الاسقاط . وليس من الضروري أن نرصف المقاطع معاً وأن نعرض الفيلم السينمائي فعلاً كي نناقش هذا اللاتناظر .

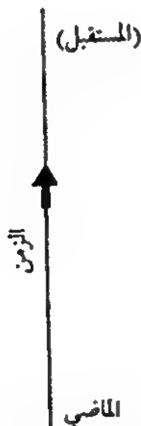
إن أحد أسباب الخلط بين هذين المفهومين المختلفين ذو منشأ لغوي معنوي . فاللاتناظر في الفيزياء يتمثل غالباً بسهم يتجه بهذا الاتجاه أو بذاك . فدوران الأرض حول محورها ، مثلاً ، يعين لا تناظراً مفيداً جداً لأنه يميز القطب الشمالي عن القطب الجنوبي . فالأرض تدور بالنسبة للواقف في القطب الشمالي بعكس دوران عقارب الساعة تحت قدميه ، وفي جهة هذا الدوران في القطب الجنوبي (لاحظ اتجاه حركة دوار الماء حول بالوعة المغطس(*)) . ولاسباب اصطلاحية تاريخية بحتة ، تتصل على الأرجح بواقع أن مخططات الملاحة قد اخترعت في نصف الكرة الشمالي ، جرت العادة على رسم أسهم على الخرائط تشير الى جهة القطب الشمالي . كما أن عدداً كبيراً من البوصلات يرسم عليها سهم بهذا الاتجاه . لكن وجود السهم المتجه نحو الشمال على بوصلة البواخر لا يعني البتة أن الباخرة تسيرفعلاً نحو الشمال . ولقد كان بالمستطاع أيضاً الاصطلاح على توجيه السهم نحو الجنوب . وعلى هذه الشاكلة فإن اللا تناظر الزمني في هذا الكون يمكن أن يتمثل بتخيل سهم موجه ، بطريقة أو بأخرى ، في الزمان . واختيار الطريقة مسألة اصطلاح بحت . وقد اختيرت عملياً جهة السهم بحيث يشير برأسه الى الاتجاه الزمني نحو التهاب العود وبذيله الى اتجاه عدم التهابه . وبدلاً من أن نطلق اسم الشمال على الاتجاه الأول نسميه اتجاه مستقبل الزمان ونسمى الأخر اتجاه ماضي الزمان . وهذا الاصطلاح يعني بالطبع أن السهم يشير أيضاً الى اتجاه تدفق الزمن النفساني . وكما أن الباخرة ليست ملزمة بالحركة نحو

(★) إن حركة هذا الدوار تحدث باتجاه حركة عقارب الساعة في نصف الكرة الشمالي ، وبعكس ذلك في النصف الجنوبي . (المترجم) .

الشمال فإن وجود لا تناظر زمني متمثل بسهم نحو المستقبل لا يُلزم الزمن بأن يتدفق نحو الأمام من الماضي الى المستقبل . بيد أن المرء يأخذ انطباعاً بهذا الالزام ، لكن ذلك لا علاقة (سطحية) له باللا تناظر الزمني . وكثير من الكتاب يتكلمون عن سهم الزمن ، أو اتجاه الزمن ، ولا يميزون بين اللا تناظر الزمني وبين تدفق الزمن .

إن إتصاف عالم الحوادث اليومية باللا تناظر الزمني راسخ كجزء من صفات الوجود لدرجة أن مهمة تصنيف الظواهر اللا متناظرة تبدو مربكة لأول وهلة . والنشاط البيولوجي هو أكثر منابع التغير اللا متناظر وضوحاً . فنحن كأفراد نبدأ حياتنا أطفالاً ونتغير ببطء أثناء النمو ثم نشيخ ، ثم نتعرض أخيراً لتغير مفاجيء جداً هو الموت . ولم نصادف قط كائنات تزداد شباباً مع الزمن . كما أن التغيرات التي تطرأ على ما يحيط بنا هي ، في غالبيتها ، من أصل بيولوجي . وتطور الزراعة وتعديل شكل المدن والتغيرات التكنولوجية ، كل هذا ينبع

شكل ٣ ـ ١ سهم الزمان . العديد من العمليات تحدث في اتجاه زمني واحد . وهذا الاتجاه (كانتشار الصدأ في حديد السيارة) يسمى المستقبل ويمكن أن يتمثل بسهم . فالسهم يدل على أن العالم الكوني لا متناظر ، لا يصف الحركة خلال الزمان ، إنها ظاهرة نفسانية من أصل غامض .



من النشاط الاجتماعي البشري ، ثم يمتد ليشمل أراضي كانت بوراً ثم راحت تعج بالحياة بعد أن تضطلع الطبيعة بشئونها . كما أن التطور البطيء للأجناس نفسها يقدم مثالاً حياً على التغير البيولوجي اللا متناظر زمنياً .

إن معظم التغير الفكري متصل بتراكم المعلومات . فمسجّلات حوادث الماضي ، لا المستقبل ، تتراكم في كل مكان . المكتبات تغص بالكتب ، والفحم الحجري مضى أوانه ، والشواطىء تكتسي بآثار الأقدام . إن الأدلة على هذا التغير ماثلة في العديد من مظاهر البيئة الأرضية . ورغم تراكم المعرفة الكلية فإن المعلومة الأفرادية النوعية تصاب بالانحطاط(*) . فالمد البحري مثلاً يمحو آثار الأقدام . فانحطاط المعلومات يحصل دوماً باتجاه زمني واحد . إن الخط الهاتفي المشوَّش لا يساهم بتاتاً في المحادثة لكنه ينقص فقط من كمية المعلومات التي تمر بين المتخاطبين .

يوجد في عالم الجمادات حولنا أصناف شتى من الظواهر اللا تناظرية التي تتسبب في التغير . فهناك تحول الجليد الى ماء ، والماء الى بخار مثلاً ، وقطعة الجليد التي توضع في ماء غالٍ تمتزج به ليشكلا معاً ماء حاراً . ولكن يبدو أن العكس مستحيل الحدوث ، أي انجماد كمية من الماء تلقائياً في منطقة يحيط بها ماء يغلي . إن عدداً كبيراً من التغيرات الوحيدة الاتجاه ذات طبيعة مبذرة . إن الاضطرابات بكل أنواعها تنزع الى الانتشار والزوال . فالحرارة تخرج من الأجسام الساخنة لتضيع سدى في المحيط الأبرد . والغازات تتغلغل في الهواء وتمتزج به ، والاضطرابات الموجية تنتشر على سطح البحيرة وتتلاشى ، وتيارات هواء الرياح تهب ثم «تختفي من تلقاء نفسها »، والحرارة والضوء الصادران عن الشمس والنجوم يتدفقان بعيداً في الفضاء الفسيح دون فائدة .

الواقع أن التغير اللا تناظري زمنياً يبدو سمة تشترك فيها كل الظواهر الطبيعية تقريباً ، حتى أن غالبية العمليات ، التي تبدو لأول وهلة تناظرية في الزمان ، تظهر بالفعل غير تناظرية بعد رصدها بامعان زمناً طويلاً . فالنواس مثلاً سيتخامد حتى يتوقف عن النوسان بسبب الاحتكاك ومقاومة الهواء ، إلا إذا غذينا حركته بواسطة محرك ـ والمحرك نفسه

(*) إن كلمة «انحطاط» مستعارة هنا بتعميم مدلولها في علم الترموديناميك (التحريك الحراري) . وهي تعني هناك تحولاً نحو الأسوأ في مزايا الجملة المادية من حيث إمكانية الاستفادة منها . «المترجم» .

تركيب مبذر . حتى أن الأرض تعاني في حركتها حول الشمس من لزوجة الوسط المادي الذي يملأ الفضاء السماوي فيتسبب ، رغم رهافته وضآلة كثافته ، في إعاقة هذه الحركة . وبمختصر العبارة في هذا الشأن نقول : إن اللا تناظر الزمني صفة تشترك فيها كل العمليات المحسوسة .

إن الواقع الجدير بالملاحظة هو أن طبيعة هذا التغير ، في معظم هذه الأمثلة ، يمكن أن تُفهم بشكل أساسي من خلال فرع خاص واحد من الفيزياء هو الترموديناميك . ورغم أن هذا العلم كان قد أنشىء في الأصل لدراسة تبادل الحرارة فيما بين الجمل المادية ولتحسين الآلات الحرارية ، إلا أن الترموديناميك الحديث ، بعد أن تم فهم أسسه المجهرية بفضل الميكانيك الاحصائي ، أصبح الآن يغطي مواضيع متنوعة لدرجة تكاد تضم ظواهر المجالات الفيزيائية المحسوسة (من الحياة اليومية) برمتها . وقد ظهر ، فوق ذلك ، مؤخراً من خلال التقدم المثير في أعالي الميكانيك الاحصائي للجمل اللا متوازنة ، أن فهم الحياة نفسها يستند على أسس ترموديناميه . فالتغير البيولوجي يصبح ، عندما ننظر إليه من زاوية اللا تناظر الزمني ، فرعاً من فروع الترموديناميك . وبالاضافة الى ذلك فإن نظرية المعلومات الحديثة يمكن أن تصاغ بعبارات مفاهيم توازي مثيلاتها في الترموديناميك والميكانيك الاحصائي . كما أن انحطاط المعلومات اللا تناظري يمكن اليوم أن يُعتبر مثالاً على عمومية مبادىء الترموديناميك .

على أنه مايزال يوجد ضرب من اللا تناظر الزمني غير ذي صفة ترموديناميه مباشرة . فأمواج الراديو مثلاً تغادر هوائي البث وتنتشر في الفضاء بسرعة الضوء . لكن العملية المعاكسة ، التي تتمثل بوصول الأمواج الراديوية تلقائياً من كل نواحي الفضاء وبتجمعها في هوائي البث ، عملية لم يلاحظها إنسان قط . بيد أن الجدير بالملاحظة هو أن الرسالة الراديوية لا تُستقبل قبل إرسالها بل بعده . وفهم هذا اللا تناظر ، وسواء في الحركة الموجية ، لايمكن استنتاجه مباشرة من دروس الترموديناميك .

إن علم الكونيات يقدم إطاراً لمناقشة التغير الكوني في المدى الواسع . فنحن نعيش في عالم يتوسع ، يتطور بخطوطه العريضة مع الزمن . ومن الطرف الآخر لدينا عالم الجسيمات الأولية الذي يدِق على المجهر والذي يقطن فيه جسيم غريب يسمى الميزون$^{\circ}$ K

. إن فترة حياة هذا الجسيم من رتبة ٥ × ١٠^-٨ ثانية فقط يتفكك بعدها الى ثلاثة جسيمات أخرى . والغريب في ذلك أن العملية المعاكسة ، أي تجمع هذه الجسيمات الثلاثة لتشكيل ميزون° K ، لا تسلك بالتدقيق (بخلاف العمليات الجسيمية الأخرى) عكس الزمن الذي يسلكه التفكك . فتفكك الميزون° K يحدد إذن اتجاهاً أفضلياً في الزمن .

إن موضوع علم الكونيات سنعالجه في الفصلين الخامس والسادس . على أننا لن نعود الى الميزون° K لأنه ، رغم أمره المحير ، لايبدو ذا تأثير عميق في قضية اللا تناظر الزمني بوجه عام . لكننا ، في هذا الفصل ، سنهتم أولاً بطبيعة ومنشأ اللا تناظر في الظواهر التي تقبل توصيفاً ترموديناميا ، ومن ثم نعرِّج على موضوع انتشار الأمواج ، الكهرطيسية منها خصوصاً .

٣ ـ ٢ اللا عكوسية والقانون الثاني في الترموديناميك

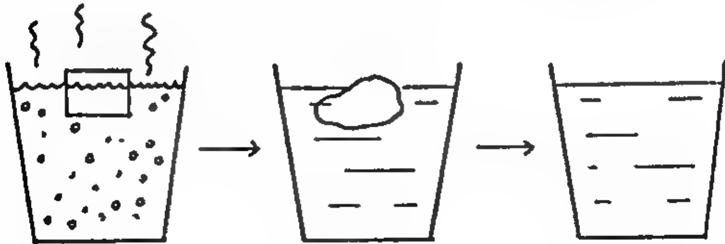
ذكرنا أن علم الترموديناميك نشأ في الأصل من الرغبة في تحسين الآلات الحرارية . فما يسمى بالقانون الأول في هذا العلم يقدم أساساً نظرياً لواقع أن الحرارة شكل من أشكال الطاقة . وهي ، ككل الطاقات الأخرى ، يمكن أن تتحول من شكل لآخر . فالآلة البخارية تركيب مدهش يحول الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية ، بينما السخان الكهربائي يحول الطاقة الكهربائية الى حرارة . إن الطاقة الكلية تنحفظ في كل التحويلات ، وما القانون الأول سوى تعبير عن هذا الواقع .

إن الحرارة تكمن في الجسم على شكل حركة جزيئية . والتسخين يسبب ازدياداً في الطاقة الحركية لجزيئات المادة ، فتصبح حركتها أسرع بالفعل . فجزيء الهواء في درجة حرارة الغرفة يتحرك بمئات الأمتار في الثانية . ينتج من ذلك أن وضع جسمين مختلفين في السخونة ، احدهما بتماس الآخر ، يجعل الجزيئات الأسرع في الجسم الأسخن تتنازل بالصدم عن قسط من طاقتها الحركية الى جزئيات الجسم الأبرد . فالحرارة تنتقل إذن من الأسخن الى الأبرد . وبعد فترة زمنية يصل الجسمان الى درجة حرارة واحدة تعم كل أجزائهما تقريباً ، فيقال عندئذ إنهما بلغا حالة توازن حراري . ولو رصدناهما زمناً أطول لما لاحظنا أي انتقال حراري آخر (شرط أن تبقى الجملة معزولة عن أي منبع حراري إضافي) .

إن هذا المثال يوضح مبدأ عاماً ينص على أن الجملة المادية المتروكة لشأنها لايحدث فيها أي انتقال للحرارة من سخونة ضعيفة الى سخونة أعلى . فسيل الحرارة التلقائي يتجه دوماً من الحار الى البارد . ويُعبر عن هذا الواقع أحياناً بالقول إن انتقال الحرارة لا عَكوس . على أنه يمكن طبعاً أن تنعكس جهة هذا الانتقال وأن تعود الحرارة الى الجسم الأبرد إذا استخدمنا تركيباً مساعداً خارجياً عن الجملة . فالبراد المنزلي مثلاً يستخرج الحرارة من جوه الداخلي ليطرحها في الهواء الخارجي الأسخن . لكن ذلك لايتم إلا بفضل آلية لا عكوسة تغذي هذه العملية بطاقة خارجية تتيح استمرار البراد في عمله .

إن الخبرة الشائعة بسريان الحرارة من الأجسام الحارة وانتشارها في الجو الأبرد المحيط هي شكل من أشكال التعبير عن القانون الثاني في الترموديناميك . إنه بوضوح قانون لا تناظري في الزمان لأنه يحول دون حدوث العملية المعاكسة ، أي انتقال الحرارة من البارد الى الحار . ومنذ أن صيغ بعبارات سيلان الحرارة اتضح أن القانون الثاني أعم بكثير وأنه يفسر أنواعاً عديدة من الظواهر «اللاعكوسة» ، اللا تناظرية زمنياً .

شكل ٣ ـ ٢-قانون الترموديناميك الثاني . إن القانون الأول يحدد كمية الطاقة التي تأخذ شكلاً حرارياً ، أما القانون الثاني فيحدد مدى انتظامها . وقد عبر لورد كلفن Kelvin (بريطاني ، ١٨٢٤ ـ ١٩٠٧) عن القانون الثاني بأنه يمنع انتقال الحرارة تلقائياً من الأبرد الى الأسخن . فالحرارة تصهر الجليد لكن الجليد لا يجعل الماء يغلي . فترتيب الحوادث الزمني يذهب دوماً من اليسار الى اليمين على الشكل . إن القانون الثاني أعظم عمومية ، وهو احسن منظم معقول للنشاط الطبيعي المعروف .



ولتوسيع دائرة القانون الثاني ليشمل تشكيلات أخرى من العمليات اللاعكوسة لجأ الفيزيائيون الى اختراع مقدار جديد أسموه الانتروبية . والتعريف الدقيق للأنتروبية تعريف رياضي ، بيد أن بالامكان إعطاءها تفسيرات فيزيائية شتى . وربما كان أكثرها نفعاً هو اعتبار الانتروبية معياراً للفوضى . أي أن الجملة التي تتمتع ببنية عظيمة الترتيب تكون أنتروبيتها صغيرة . أما الجمل ذات الانتروبية العالية فهي جمل فوضوية مشوشة . فالجملة المؤلفة مثلاً من جسم بارد قريب من جسم حار ذات أنتروبية أخفض بقليل من أنتروبية الجملة نفسها وهي في توازن حراري في درجة حرارة واحدة . وسبب ذلك أن المحتوى الحراري للجملة يكون أحسن ترتيباً عندما يتركز بمعظمه في الجسم الحار منه عندما يتوزع بالعدل على كل أجزاء الجملة . وبتعبير آخر ، يوجد بنية أكثر سمواً في الحالة الأولى .

إن كل ذلك يوحي بأن قانون الترموديناميك الثاني يمكن أن نلفظه على الشكل التالي : **إن انتروبية الجملة المعزولة لاتتناقص أبداً** . ومن الضروري أن نحصر هذا القول بالجمل المعزولة ، أي الجمل الموضوعة في وعاء مختوم لاتخترقه الحرارة . فمن الواضح أنه إذا أتيح للجمل الخارجية أن تتبادل حرارة مع الجملة المدروسة فإن الأنتروبية يمكن أن تتناقص ، وذلك مايحدث مثلاً لدى استعمال مضخة حرارية تنقل الحرارة من البارد الى الحار (كما في براد المنزل) . لكننا لو دمجنا في جملة واحدة الجملة المدروسة مع المضخة مع تركيب التغذية بالطاقة . . . الخ ، فإن قانون الترموديناميك الثاني يقضي بأن تزداد الأنتروبية الكلية للجملة المدموجة (أو أن تبقى على قيمتها في أحسن الأحوال) . وقد لانبالغ في تعميم هذا القانون إذا قلنا إن أنتروبية العالم الكوني(*) لايمكن أن تتناقص .

فباستخدام فكرة الأنتروبية نرى أن شرط التوازن الحراري يتحقق في بلوغ الأنتروبية العظمى . وكل تغير يطرأ على الجملة المعزولة يسعى الى زيادة أنتروبيتها . وعندما يتوطد التوازن في نهاية الأمر يتوقف التغير ويتوقف معه ازدياد الأنتروبية : لقد بلغت القيمة العظمى .

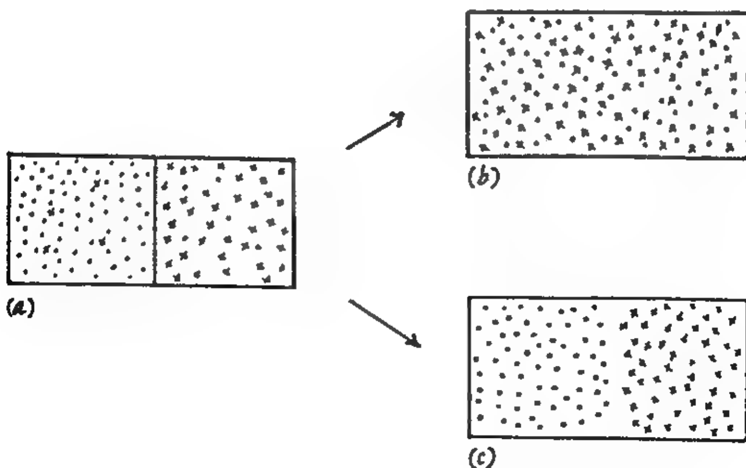
يمكن أيضاً أن نجد صلة بين الأنتروبية والمعلومية . إذا كانت الجملة في ظروف

(★) أليس هو بأسره جملة معزولة ؟ «المترجم» .

ترتيب عال فإن توصيفها يتطلب مقداراً كبيراً من المعلومات ، أو ، من وجهة نظر أخرى ، أن الجملة تحوي كمية من المعلومـات . أما الجملة الفوضوية فتحوي معلومات قليلة . وأوضح مثال على ذلك ترتيب الحروف في هذه الصفحة . فإذا كانت هذه الحروف مرصوفة بالـترتيب الصحيح تكون المعلومات محتواة في الكلمات والجمل و . . الخ . أما الرصف المختلط الفوضوي لهذه الحروف فلا يقدم للقارىء معلومات تذكر . فالمعلومية تتحدد إذن بأنتروبية سالبة (أو سالروبية كما يقال أحياناً) . وعندما تزداد الأنتروبية يزداد خسران المعلومات .

إن صياغة قانون الترموديناميك الثاني بلغة الأنتروبية تمتاز نفعاً بعموميتها . وعلى هذا سنلجأ مراراً ، في هذا الكتاب، الى مثال توضيحي لاينتمي البتة الى انتقال الحرارة . لنتأمل في غازين مختلفين ، نسميهما A و B ، محصورين في وعاء يعزلهما تماماً عن العالم الخارجي . وهـذا الوعاء المرسوم في الشكل ٣ ـ ٣ يتألف من صندوق مقسوم الى نصفين بحاجز في

شكل ٣ ـ ٣ . قانون تزايد الأنتروبية . الغاز A يتمثل بنقط والغاز B بصلبان . عندما نخرج الحاجز من الصندوق يختلط الغازان . إن الحالة (a) أحسن ترتيباً من الحالة (b) فهي إذن ذات أنتروبية أخفض ، كما يتطلب توصيفها معلومات أكثر (يجب أن نعلم حالة المزيج في كل من جانبي الحاجز بدلاً من انفصاله) . إن تناقصاً تلقائياً للأنتروبية (أي تنظيماً ذاتياً للجملة) يقود الى الحالة (c) يبدو مستحيل الحدوث .



وسطه . تحوي الحجرة اليسرى مزيجاً نسبة A فيه تساوي ٩٠٪ و B ١٠٪ . أما الحجرة اليمنى فتحوي ٩٠٪ من B و ١٠٪ من A . وفي لحظة ما نسحب الحاجز خارج الصندوق . وبعد فترة قصيرة تتغلغل جزيئات الغازين بعضاً في بعض ، من جراء حركاتها العشوائية السريعة ، حتى يحدث اتفاقاً أن يختلط الغازان ليشكلا مزيجاً شبه متجانس يحوي ٥٠٪ من A و ٥٠٪ من B في كلا النصفين . واضح أن هذه الواقعة لا تناظرية زمنياً ، لأننا لا نتوقع أن يعود الغازان لينفصلا تلقائياً ، كلا في نصف على حده . فواقعة الاختلاط تذعن لقانون تزايد الأنتروبية (الفوضى) ، لأن انتروبية الظرف الأولي ، عندما كان الغازان منفصلين ، أحسن ترتيباً (وتحوي معلومات أكثر) من الحالة الفوضوية للخليط بعد إخراج الحاجز .

إن التعميم المستخلص من هذا المثال ينص على المبدأ الطبيعي التالي : إن الانتظام ينزع الى إفساح الطريق نحو الفوضى .

إن هذا المبدأ معروف في خبرة بني البشر . فانجاز درجة عالية من النظام والبنية المرتبين أصعب بكثير من نشر الفوضى . وتحويل المنزل بالهدم الى ركام من الأحجار عملية سهلة ، لكن إعادة بنائه حجراً بعد حجر تحتاج الى جهد وعناية كبيرين . ويوجد جمل تظهر فيها البنية طبيعياً ، وقد تبدو لأول وهلة مناقضة لقانون الأنتروبية . فالجمل البيولوجية تميل الى التطور نحو بنى أعقد ، والبلورات التي تتشكل في السوائل تنطوي على طبقات من الذرات أحسن تنظيماً من ذرات السائل ، وهكذا . على أن فحص هذه الوقائع بامعان يكشف عن أن مجمل الأنتروبية للجملة ومايحيط بها يتزايد في كل الأحوال . فالنشاط البيولوجي مثلاً لا يستمر إلا بفضل تزايد أنتروبية ضوء الشمس الذي يمد الحياة الأرضية بالغذاء الطاقي . ولو وضعت نبتة أو حيواناً في صندوق مغلق لقضيا نحبهما بعد قليل انسجاماً مع المبدأ القائل بأن الانتظام يفسد بالانعزال ويتحول الى فوضى .

إن أول محاولة لتفسير كيف يفسح النظام الطريق الى الفوضى قام بها لدفيغ بولتزمان L.Boltzmann (نمساوي ، ١٨٤٤ ـ ١٩٠٦) عام ١٨٦٦ . وعندما أُدخلت فكرة الأنتروبية ، لأول مرة في الترموديناميك ، كانت النظرية الذرية للمادة في بداياتها . وكانت الأنتروبية قد صيغت عملياً لتناول كميات محسوسة ، كدرجة حرارة الغاز وضغطه وهو في حالة توازن . وعندئذ ، وفي حوالي منتصف القرن التاسع عشر ، حاول رودولف

كلاوزيوس R.Clausius (ألمـاني ، ١٨٢٢ ـ ١٨٨٨) ومكسويل رد الفـروق في حالات الغـازات الى فروق في ترتيبـات الجزئيات المكونة لها . وكان يفترض أن الجزيئات نفسها تتحرك كجسيمات صغيرة تطيع قوانين نيوتن في الميكانيك . وباجراء تحليل رياضي لآثار الحركات الجماعية لأعداد كبيرة من الجزيئات المتماثلة أمكن تفسير خصائص كدرجة حرارة الغاز وضغطه في حالة التوازن . وفي هذا المجال المجهري يتفسر ضغط الغاز بانضمام القوى النـاجمة عن الصدمات الصغيرة التي تقوم بها الجزيئات المفردة عندما تنهمر على جدران الوعاء . أما درجة الحرارة فتترجم عن سرعة حركة الجزيئات ، أي أن الغاز يصبح أسخن عندما تزداد سرعة طيران جزيئاته . أما المحتوى الحراري للغاز فهو مجموع الطاقات الحركية لكل هذه الجزيئات (وربما مع طاقة ذاتية داخلية تملكهاهذه الجزيئات من جراء دورانها حول نفسها أو اهتزاز الذرات المكونة لها) .

عمم بولتـزمان هذه النظرية في حركة الجزيئات على الحالات اللاامتوازنة محاولاً أن يصف رياضياً كيف تتطور الجملة بتلقاء ذاتها من حالة اختيارية بدئية الى حالة التوازن . إن هذا التطور الوحيد الاتجاه في الزمن يكمن في أعماق اللا تناظر الزمني للعالم الفيزيائي . ورغم أن بولتزمان قد اكتفى بدراسة خواص نموذج معين يمثل غازاً محصوراً في صندوق عازل ، إلا أن الدراسات التي تناولت نماذج أكثر تعقيداً لم تتكشف عن أي مبدأ أساسي جديد يختص باللا تناظر الزمني .

يوجد عموماً ، من أجل أية حالة محسوسة للغاز المحصور في الصندوق ، عدة أنساق مختلفة ، لتوزيع مواقع وسرعات الجزيئات ، تتلاءم كلها مع حالة الغاز . لكن بعض الحـالات يمكن أن تتحقق بأنسـاق عددها أكبر مما يتعلق بسواها . إذ يوجد مثلاً ، من أساليب التنسيق لجعل الغاز موزعاً بالتساوي في حجم الصندوق كله ، عدد أكبر مما يوجد عندما يكون الغاز كله محصوراً في منطقة صغيرة واحدة من الصندوق . كما أنه يوجد عدد قليل نسبياً من أساليب التنسيق التي تجعل كل الجزيئات تتحرك في اتجاه واحد . بينما عدد الأنساق التي تختص بحركات فوضوية كلها كبير جداً . وهكذا نرى أنه كلما تحسن انتظام الحالة قلّ عدد الأنساق المحققة لها . فالحالات ذات الأنتروبية العالية تحصل بأنساق أكثر عدداً من تلك التي تتعلق بحـالات ذات أنتروبية منخفضة . وفي هذه النظرية الحركية

لجزيئات الغازات يوجد حالة واحدة تحصل بعدد من الأنساق يفوق كل عدد يختص بحالة سواها . إنها حالة الأنتروبية العظمى بفوضاها الكاملة . فالتوازن هو إذن الحالة التي يمكن أن تحصل بـ «أرجح احتمال» إذا كانت الجزيئات موزعة عشوائياً .

إن جوهر أعمال بولتزمان بخصوص تطور الغاز نحو التوازن ، والمحتوى فيما أسماه النظرية H ، ناجم عن الجمع بين قوانين نيوتن في الميكانيك وبين فرضية تخص صفة العشوائية التي يختارها الغاز النموذجي لاعادة ترتيب نفسه .

هذا وإن تغيرات الأنساق الجزيئية تحصل عندما تتصادم الجزيئات المفردة بعضاً ببعض . ومفعول هذه التصادمات يقوم بعملية خلط للتوزع المجهري للجزيئات . فاذا كان هذا الخلط يحدث بما يكفي من العشوائية فمن تحصيل الحاصل أن الغاز يمر من حالة ترتيب ما وأنتروبية منخفضة الى حالة التوازن الأكثر فوضوية . وهذا ناجم بالضبط عن كون الأنساق الفوضوية المجهرية أكثر بكثير عدداً من الأنساق المرتبة . وهذا يقابل في مستوى الذرة ، وبكل بساطة ، خبرتنا الشائعة في أن كداسة أوراق اللعب المرتبة بتوال معين تمر دوماً ، عندما تخلط عشوائياً ، الى توال عالي الفوضى . فحظ الخلط في أن يؤدي ، من كداسة أوراق اختيارية التوالي الى كداسة تتوالي فيها الأوراق ذات النقش الواحد توالي الأعداد الطبيعية ، هو حظ صغير لدرجة لاتصدق .

عندها تبنى بولتزمان فرضية تخص طبيعة التصادمات الجزيئية ، وتنص على أن حركات الجزيئات إزاء التصادم هي نفسها سواء حدثت التصادمات أم لم تحدث . وهذا يعني، بسبب أن الجزيئات لا «تعلم» أن تصادماً على وشك الحدوث ، أن حركاتها لا تتأثر (لاصلة لها) به مسبقاً بحال من الأحوال . لكن الحركات بعدالتصادمات تتعلق طبعاً بواقع أن التصادم قد حدث .

لقد أطلق بولتزمان على هذه الفرضية اسم فرضية الفوضى الجزيئية . إن الجسيمات المتحركة فوضوياً تخرب ماكان لها من نسق رتيب . ويتمثل انجاز بولتزمان بتقديم برهان رياضي محكم على هذا التوقع في نموذجه الغازي . وقد اكتشف في هذا البرهان مقداراً ، رمز له بـ H ، يتعلق بالنسق الذي تترتب الجزيئات وفقه . وتنص النظرية H على أن هذا المقدار لايمكن إلا أن يزداد مع الزمن . ولدى فحص المقدار H عن كثب تبين أنه ينطبق

على الأنـتروبية . وبـذلـك كانت النـظرية H تُعـد تعبـيراً ذرياً مبـاشراً عن قانون تزايد الأنـتروبية . ويظهـر أنها توجـه الآلية التي بواسطتها تتصرف الجمل الترموديناميـة بشكل لا تناظري في الزمن . لقد كان ذلك بلا ريب واحداً من أعظم الانجازات حقاً في تاريخ الفيزياء النظرية . والمزعج الوحيد هو أن النظرية H لبولتزمان قد انُتهكت في مفارقة أساسية وطاغية بقيت موضع أخذ ورد ، بشكل أو بآخر ، في جدل استمر قرناً في الزمان بعدها .

٣ ـ ٣ مفارقة العكوسية

لايوجد أدنى شك في أن النظرية الجزيئية المعتمدة على ميكانيك نيوتن وحده عاجزة عن تقديم البرهان على أن أنتروبية الجملة المعزولة تتزايد دوماً . والسـبب بسيط جداً : إن ميكانيك نيوتن تناظري في الزمن . بمعنى أن أية حركة للذرات تحدث وفق قوانين نيوتن الحركية يمكن أن تحدث بشكل معكوس متفق هو أيضاً مع هذه القوانين . فكل تصادم وكل مسار تسلكه الذرات ، في نموذج بولتزمان ، عكوس في تواليّ أحداثه . فالآلية التي تعتمد عليها النظرية عاجزة إذن عن تقديم سبب لأفضلية اتجاه زمني على آخر . وبما أن اللا تناظر لايمكن أن ينجم عن التناظر فإن النظرية H ، التي تنص على تزايد الأنتروبية لا تناظرياً في الزمان وتعتمد على قوانين نيوتن التناظرية ، لابد أن تكون خاطئة . إن هذا الاعـتراض لا يمحوه أن نعلم الآن أن ميكانيك نيوتن لايقدم توصيفاً صحيحاً للظواهر الحركية الذرية التي يسيطر عليها ميكانيك الكم . وليس الميكانيك النسبوي بأحسن حظاً في هذا الشأن. فهذان التعديلان عاجزان كلاهما وعلى حد سواء ، عن منح امتياز لاتجاه زمني على آخر . فإذا كان بولتزمان قد أثبت أن الأنتروبية لايمكن أن تتناقص ، فلابد أنه كان قد دس لاتناظراً زمنياً في مكان ما ، بالإضافة إلى قوانين الميكانيك .

إن أول اعـتراض على «التفسير» الميكانيكي البحت لقانون تزايد الأنتروبية أعلنه لوشميت J.Loschmidt عام ١٨٧٦ . فالظاهر أن نظرية بولتزمان كانت تقول مايلي : إختر أي حالة لأي غاز ، دع بعض التصادمات تحدث ، إحصل على حالة جديدة ، إن أنتروبية الحالة الجديدة لايمكن أن تكون أقل من انتروبية الحالة الأولية . لقد نقض لو شميت هذه النتيجـة بأن وجـد حالات تتناقص فيها الأنتروبية فعلاً . إن هذه الحالات هي ببساطة

معكوسات الحالات النهائية المذكورة . لأنك لو افترضت أن كل الحركات الجزيئية في حالة الأنتروبية الأكبر قد انعكس اتجاهها كلها دفعة واحدة ، بآلية سحرية ، فإن الغاز سيرتد «راجعاً» الى حالته الأولية ذات الأنتروبية الأصغر. وسبب ذلك هو: بما أن كل تصادم جزيئي فرد هو تصادم عكوس ، فإن حركة الغاز بمجمله لابد أن تكون عكوسة إن النتيجة المحتومة لاعتراض لو شميت هي : ليست كل حالات الغاز منطوية على تزايد انتروبي محتوم .

وهناك اعتراض آخر أثاره زرميلو E.Zermelo يعتمد هو أيضاً على التناظر القائم في أحشاء قوانين الميكانيك . كما برهن بوانكاريه H.Poincaré (فرنسي ، ١٨٥٤ - ١٩١٢) على نظرية عامة تخص جملاً ميكانيكية معزولة تطيع قوانين ميكانيكية عكوسة . تنص هذه النظرية على أن الجملة التي من هذا النوع تعود ، عدداً لا متناهياً من المرات ، لتقترب بقدر ما نريد من أية حالة معطاة . ينتج من هذه النظرية مايلي : إذا كان الغاز ، المحصور في الصندوق ، في حالة أنتروبية صغيرة في البدء فلابد من أن يعود اتفاقاً الى الجوار القريب من هذه الحالة (ذات الأنتروبية الصغيرة) . ولا سبيل أمام الجملة لأن تعود ثانية الى حالة الأنتروبية المنخفضة دون أن تنتهك نظرية بولتزمان H .

إن نظرية بوانكاريه تلفت النظر لدرجة تدعو الى الاستمتاع ببعض نتائجها . إذ يمكن أن نعبر عنها بالنص الخام التالي : كل مايمكن أن يحدث ، في الجملة المعزولة كلياً ، سيحدث وبعدد لا متناه من المرات ! لنتأمل فيما يحدث في غرفة معيشتي لو كانت موصدة ومعزولة كلياً عن العالم الخارجي . فبعد زمن طويل لدرجة كافية ستقفز طاولتي من تلقاء نفسها نحو السقف ، والأزهار التي ذوت وماتت منذ مدة مديدة ستزدهر من جديد . وسأخلق أنا نفسي خلقاً جديداً عدة مرات . وقد يحدث اتفاقاً أن تهرع ذرات الهواء كلها الى قرنة واحدة . إن كل مثل هذه الأشياء الغريبة يمكن أن تحدث مرات ومرات دون حدود . لكن المزعج الوحيد هو ضرورة أن أنتظر دهراً طويلاً قبل أن أرى واحداً منها . إن هذا الذي يسمى زمن بوانكاريه التكراري ربما كان أطول ما يمكن أن نتصوره في سلّم الزمن . إن تقديره ، بأبخس قيمة ، يصل به الى ١٠^ن حيث ن عدد الجسيمات المكوّنة للجملة . والكائن البشري محوط، في جواره القريب ، بعدد من الذرات قد لا يختلف كثيراً

عن 10^{26} ذرة . ولابد من تمثل عدد بوانكارية ، $10^{10^{26}}$ ، بعناية : إنه واحد متبوع بـ 10^{26} صفراً . وقد لا تهم هنا واحدة الزمن للتعبير عن هذا العدد ـ ثانية كانت أم عمر العالم ـ فماذا تزن عشرة من الأصفار أو نحوها أمام 10^{26} صفراً ؟ هكذا إذن تعلمنا نظرية بوانكاريه أن المعجزات يمكن أن تحدث ، لكنها أندر بما لايقاس مما يمكن أن يتوقعه أعظم المتشائمين .

يمكن أن يعترض المرء بأن العزل الكلي لغرفة معيشتي أمر مستحيل فيزيائياً على كل حال ، وهـذا قول صحيح . لكن اعتبار العالم الكوني بمجمله جملة معزولة مقبولة أمر مشروع ويصح أن نطبق عليه نظرية بوانكاريه ، وحتى أن بولتزمان كان يعتقد أن حالة العـالم الـراهنـة هي من معجزات بوانكاريه فعلاً . وسنعود الى هذه النقطة وسواها من المستجدات في الفصلين الخامس والسـادس .

فإذا عدنا الآن الى القضية الأساسية فيما يخص نظرية بولتزمان H ، والاعتراضات التي ذكرناها ضد المكوسية ، تتضح نتيجة هذه الاعتراضات . فبالاضافة لقوانين نيوتن الميكانيكية اعتمد بولتزمان على فرضية الفوضى الجزيئية . وفرضية الفوضى هذه ليست دوماً صحيحة . ولفهم كيفية فشلها نفحص بعناية أكبر الحركة المجهرية للجزيئات . وسنركزانتباهنا على حالة مجموعة قليلة العدد من جزيئات تتجول كيفما اتفق في صندوق مغلق وتتصادم وتنزو بعضا على بعض باستمرار ، فتنتقل من نسق حركي لآخر دون انقطاع . إن السلوك الاجمالي لهذه المجموعة الصغيرة سيكون ، في معظم الأحيان ، شيئاً لا يؤبه له . فعدد مايتجه منها نحو اليمين ، مثلاً ، يختلف كثيراً عن عدد مايتجه منها نحو اليسار . لكن قد يحدث اتفاقاً نادراً أن تصبح كل الحركات في استقامة واحدة ، أو أن يطرأ عليها شيء متميز من هذا القبيل ، كل ذلك بصدفة بحتة تطرأ على هذه الحوادث . إن مثل هذه الانحرافات الطارئة ستزيد في تفاقم التفاوتات(*) الاحصائية في الغاز . إن بالامكان رصد هذه التفاوتات ، في غاز حقيقي ، بالنظر وذلك فيما يسمى بالحركة البروانية . فالجسم

(*) نعني بكلمة «تفاوت» في هذا الكتاب ، انحرافاً عن الحالة الوسطية التي هي أرجح الحالات في علم الاحصاء . وعلى هذا يمكن اعتبار التفاوت خروجاً ممكناً عن الحالة الطبيعية . «المترجم»

المجهري الموضوع في نسق جزيئات متقلب باستمرار لايبقى في مكانه بل يعاني صدمات فوضوية متوالية تجعل مساره خطاً متكسراً فوضوياً .

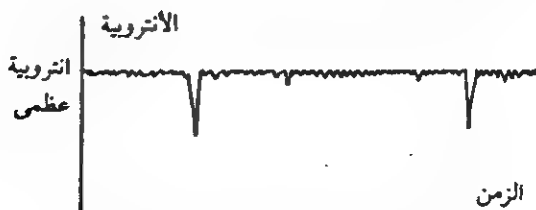
وبنظرة بسيطة الى علم الاحصاء نرى أن احتمال ظهور تلك الاستقامة على حركات الجزيئات كلها يصغر بانحدار شديد كلما ازداد عدد هذه الجزيئات . فحظ جزيئات الغاز كله في أن تكتسب بالصدفة البحتة مثل ذلك التفاوت المتميز (أي أن تصبح حركاتها منحهة كلها معاً نحو الجدار الأيسر من الصندوق مثلاً) هو حظ عبر بعيد عن الاستحالة لكنه مع ذلك ليس معدوماً تماماً . وعلى هذا يمكن للأنتروبية أن تتناقص كما يمكن للغاز أن ينظم نفسه بنفسه في نسق بنوي أحسن ترتيباً . لكن مثل هذه الصدفة أندر عملياً من أن تذكر . وكمثال نموذجي نتخذ من جديد مثال الصندوق ونصفيه ، الذي وصفناه في الفقرة السابقة . فبموجب نظرية بوانكاريه سيحين اتفاقاً الزمن الذي تصبح فيه الذرات التي من النوع B ، والموجودة في النصف الأيسر ، متحركة كلها معاً نحو اليمين وكل الذرات A الموجودة في النصف الأيمن متحركة نحو اليسار . فإذا أزيل الحاجز في تلك اللحظة فإن الغازين سينفصلان مارين من الحالة (*a*) إلى الحالة (*c*) في الشكل ٣ـ٣ . لكن احتمال إزالة الحاجز في لحظة وقوع هذا الحادث النادر جداً صغير لدرجة يحق لنا أن نتخذه قانوناً من قوانين الطبيعة .

وعلى أساس هذا التفسير الاحصائي الجديد يمكن أن نوفق بين النظرية H واعتراضات العكوسية ، ونقول : إذا كانت الجملة في حالة مرتبة نسبياً ، حالة انتروبية منخفضة ، فإن من شبه الأكيد أنها ستغير من حالها الى حالة أقل ترتيباً ، حالة انتروبية أعلى ، لكن ذلك ليس محتوماً عليها . ومن جهة أخرى بالتناظر ، لابد أيضاً وباحتمال عال من أن تكون الجملة قد بلغت تلك الحالة المنخفضة الأنتروبية انطلاقاً من حالة كانت في الماضي ذات انتروبية أعلى . وهذا يعني أننا لو نخبنا عشوائياً حالة من حالات الأنتروبية المنخفضة فاننا سنحصل بأرجحية كبيرة على أنتروبية قريبة من الأصغرية . وهذا مايمكن أن نستنتجه من التأمل في السلوك الزمني ، على المدى الطويل ، لغاز معزول في صندوق ، ومما نشرحه في الشكل ٣ـ٤ . إن الغاز ، في أغلب أوقاته ، قريب من حالة التوازن في انتروبية أعظمية تتميز جزيئاتها بحركات فوضوية تماماً وبتوزيع مكاني عادل . لكن تفاوتات

ضئيلة تقع بين وقت وآخر تشوش قليلاً هذا التوازن المطمئن وتكتسب الجملة ، تلقائياً ، قسطاً من الترتيب يهبط بالانتروبية في حفرة صغيرة لاتلبث بعدها أن تعود الى الاستواء بفضل التصادمات العشوائية . وفي أوقات نادرة جداً جداً يقع تفاوت كبير يهبط بالأنتروبية فجأة إلى بئر عميقة ، كأن تتجه مثلاً كل الجزيئات معاً باتجاه واحد في الصندوق . فاذا نخبنا عشوائياً حالة انتروبية منخفضة فمن شبه المؤكد أن نستخرج حالة قريبة من إحدى الحفر الصغيرة ، لأنها أكثر عدداً بكثير من الآبار . وهذا يعني ان الغاز ، إذا انتقل بنفسه الى حالة لافتة للنظر ، فمن الأرجح بكثير أن تمثل هذه الحالة حداً لسلوكه العجيب ، من أن تمثل مرحلة من مراحل اقتراب مستقبلي من حالة أحسن ترتيباً وأكثر شذوذاً . أما في قعر أحد المنخفضات فإن منحني الأنتروبية واضح التناظر بين الماضي والمستقبل . إن فرضية الفوضى الجزيئية جيدة عند هذه النقطة ، لكنها تنطبق على اتجاهي الماضي والمستقبل على حد سواء .

ففائدة نظرية بولتزمان H هي أنها تفسر كيف يمكن للنسق الغازي أن يمر من حالة أنتروبية منخفضة الى حالة التوازن . لكنها مع ذلك لاتفسر لماذا يحدث هذا المرور في اتجاه

شكل ٣ ـ ٤ . إن صندوق الغاز المعزول لايمكن أن يميز الماضي عن المستقبل . فالأنتروبية يمكن أن تتغير من قيمة أعظمية عندما يضطلع الحظ بعملية ترتيب يجعل الجزيئات في حالة جماعية لافتة للنظر . هذه الحالات تتمثل بالمنخفضات . إن الآبار أقل تواتراً من الحفر الصغيرة في خط الانتروبية بمرور الزمن . إن هذا الخط يبين بوضوح أن تغيرات الانتروبية ليست موجهة باتجاه مفضل في الزمان .



زمني وحيد ـ من الماضي الى المستقبل . إن اللا تناظر الزمني من لاينبثق من نموذج بولتزمان

٣ ـ ٤ فرضية الجمل الفرعية

إن فحص الشكل ٣ ـ ٤ يُظهر سريعاً أن الغاز المحصور في صندوق عازل لا يتصرف بشكل لا تناظري . فسلوكه على مدى زمن طويل يتيح له أن يرور حالات ذات انتروبية منخفضة في مناسبات نادرة . لكن عدد هذه المرات يساوي عدد مرات ازدياد الأنتروبية . فمنحى الزمن ، في الشكل ٣ ـ ٤ ، يمكن أن يُسلك في الاتجاهين

واضح أن الجمل الواقعية ليست كذلك والللا تناظر الزمني حقيقة من حقائق الحياة . فصناديق الغاز في عالم الواقع لابد أن تكون مختلفة بشكل أساسي عن نموذج بولتزمان . فما هو الفرق بينهما ؟

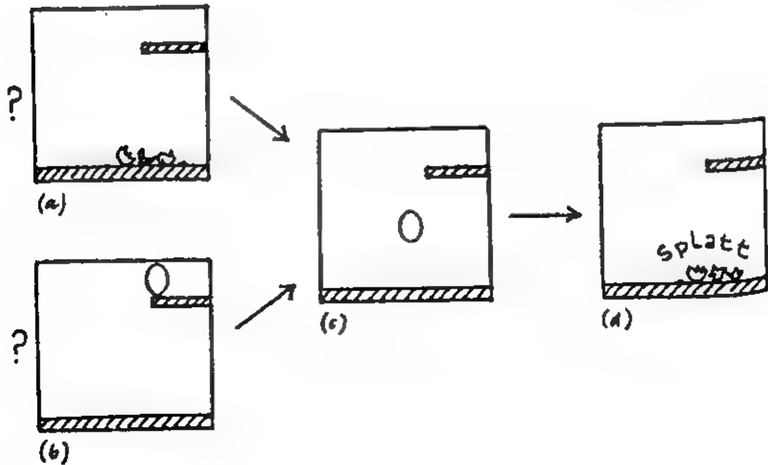
إن اعتماد نموذج بولتزماني محسّن لا يغير شيئاً من جوهر الأمر . والجواب عن هذا السؤال يأتي من معرفة كيف تبلغ الجملة الواقعية أولاً حالة الأنتروبية المنخفضة . فكل حالة انتروبية منخفضة هي ، في نموذج بولتزمان ومن شبه المؤكد ، حالة أنتروبية أصغرية لأنها تتولد بتفاوت عن التوازن . ومن غير المعقول أن نتوقع ذلك في جملة واقعية . فأنا ، لو صادفت أثناء تجوالي على الشاطىء أطلال قصر رملي ، أستنتج أنه كان يوجد هنا مرة قصر رملي بكامله . لكن المحاكمة المطبقة على جملة بولتزمانية تتفق أكثر بكثير مع الافتراض بأن المفعول التخريبي للريح والموج سيكون بالتأكيد مسئولاً عما يمكن أن يصيب القصر الرملي من انمساح وتمليس (إن الحالة الملساء هي حالة التوازن) ، فأنا لن أستنتج مع ذلك أن الريح والموج لابد أن يكونا ، هما أيضاً ، مسئولين عن معجزة تشكل هذه البنية في أول أمرها . إن الشاطىء ليس جملة معزولة كلياً ؛ إن إنساناً ما قد بنى هذا القصر الرملي قبل مدة قصيرة . أي أن الجملة قد بلغت أنتروبيتها المنخفضة ، حالتها المرتبة ، لا بتفاوت أندر من العنقاء يطرأ على الريح والموج ، وهما اللذان أحدثا تخريب البنية القصرية للرمل ، بل بمداخلة خارجية .

لنعد إلى مثالنا السابق في صندوق يحوي غازين ، A و B . إن النسق البدئي ، ٩٠٪ و ١٠٪ ، يمكن أن يحصل من خليط متجانس ، بعد صبر طويل في انتظار « معجزة »

تفاوت تطرأ على خليط الـ ٥٠٪ ، ٥٠٪ ، وبادخال الحاجز لحظة حصول ذلك النسق . لكن مثل هذه العملية المعجزة لا يمكن الركون إليها بتاتاً . وعلى المرء ، بدلاً من ذلك ، أن يصنع صندوقاً حاوياً وأن يضع فيه الغازين بالنسبة المطلوبة . فالجمل الواقعية تستمد ترتيبها بفعل آت من العالم الخارجي ، لا من تفاوتات عشوائية عظيمة .

إن من المفيد أن نفكر بالجملة على أساس أنها كائن تشكل من جديد نتيجة مداخلة خارجية . فالجمل الواقعية ، في أحوال عديدة ، لا توجد قبل تدخل فعل خارجي ؛ كحال

شكل ٣ ـ ٥ . الجمل الواقعية جمل فرعية . إذا رأيت بيضة أثناء سقوطها (c) أتنبأ بمعقولية كاملة أنها ستنكسر (d) بعد برهة وجيزة . ولا أظن أنها كانت مكسورة كما في (a) من قبل . افكر أنها هوت من الرف (b) . لو كانت الجملة معزولة ، أي لو كانت بولتزمانية حقاً ، فان (a) أرجح من (b) بكثير . أما في الواقع فان حصول (c) بعد (b) هو المعروف ، في حين أن حصول (c) بعد (a) معجزة . فـ (a) لا يمكن أن تتحول إلى (c) إلاّ إذا تجمع فتات البيضة المتناثرة ، بالتعاون مع أرض الغرفة ، ليشكلا بيضة سليمة تقفز نحو الأعلى بحركة مرسومة ، ومن ثم تسقط ثانية نحو تحطمها . إن التسلسل (a)←(c)←(d) تناظري الزمن ، بينما التسلسل (b)←(c)←(d) لا تناظري . ولايجاد أصل اللا تناظر يجب أن نجيب عن السؤال التالي : كيف حصل أن وُجدت البيضة على الرف ؟



مكعب من الجليد في ماء يغلي مثلاً . وواضح أن كل الجمل ، في عالم الواقع ، لابد أنها قد شكلتها البيئة الواسعة في مرحلة ما .

ولكي نميز الجمل الواقعية ، التي تتشكل في حالة أنتروبية منخفضة بالانفصال عن بقية العالم ، عن الجمل المعزولة على الدوام (الجمل البولتزمانية) أدخل الفيلسوف هانس رايشنباخ (ألماني ، ١٨٩١ ـ ١٩٥٣) عبارة « جملة فرعية » في توصيف الجملة الواقعية . فكل الجمل الواقعية هي في رأيه جمل فرعية من نوع أو من آخر . وغالباً ما يوجد ، لهذه الفروع ، تسلسل كامل في المراتب ؛ كل فرع يتعلق ، من حيث بنيته المرتبة ، بفرع آخر . وسنعود في الفصل السادس إلى كل هذه الفروع لنبيِّن انتهاءها إلى جذع مشترك .

إن كل جملة فرعية متشكلة تتصرف لا تناظرياً في الزمان لأنها نشأت عن تدخل خارجي . إن اللا تناظر موجود في التدخل ، لا في الجملة . كل هذا معقول حتى الآن ، لكن فحص هذه الخطوة الحيوية لا ينبىء في أي اتجاه يحدث اللا تناظر ، سوى أنه سيحدث . كما أننا غير متأكدين في كل مرة من أن الجملة قد صيغت كجملة فرعية ، أو أن مداخلة قد حصلت لها أم لا ، لأن اللا تناظر الزمني يحدث بالاتجاه نفسه في مختلف هذه الظروف .

إن هذه الملاحظات موضحة جيداً بالآلية المشروحة في الشكل ٣ ـ ٣ . إن الصندوق ، عندما يكون مقسوماً فعلاً بالحاجز ، يؤلف حقاً جملتين منفصلتين . ويؤلف جملة واحدة عندما نزيل الحاجز . فتدخل العالم الخارجي هو عملية إخراج الحاجز من الصندوق .

لنتأمل في التجربة التالية . ننطلق من مزيج ٩٠٪ من A و ١٠٪ من B في النصف الأيسر، ومزيج ٩٠٪ من B و ١٠٪ من A في النصف الأيمن . لنخرج الحاجز بضع لحظات ثم لنعده . فما هي النتيجة ؟ إن من المتوقع عموماً أن تكون النتيجة قريبة من مزيج ٥٠٪ من A و ٥٠٪ من B في كلا النصفين . لنكرر الآن التجربة باخراج الحاجز من مزيج ٥٠٪ من A و ٥٠٪ من B وباعادته . فما هي النتيجة ؟ إن التوقع العام يقضي الآن بعدم تغير أي شيء ؛ فالمزيج يبقى كما كان .

إنها مفارقة محيرة ، لأن المداخلة الخارجية تبدو في هذه التجربة ذات تناظر زمني

ـ يُخرَج الحاجز ثم يُدخَل . لنصور القسم الأول من هذه التجربة على ثم سيـ ولنعرضه بالمقلوب فنرى الحاجز يخرج ، والغازين ينفصلان ، والحاجز يعود من جديد . إن هذا ليس الوصف الصحيح للتجربة الثانية رغم أن الظرف البدئي للغاز في الحالتين واحد في المجال المحسوس . إن الفلم يظهر الانتقال من مزيج ٥٠٪ و ٥٠٪ إلى مزيج ٩٠٪ و ١٠٪ ، لكن التجربة الفعلية تدل على أن الغاز يبقى على ٥٠٪ و ٥٠٪ دون تغيير . فلماذا يُظهر الفلم المعروض بتسلسل تصويره الحوادث كما وقعت في التجربة الأولى ولا يُظهر عرضه بالمقلوب الحوادث كما وقعت في التجربة الثانية ؟ وفوق ذلك ، لماذا يتوقع المرء أن ١٠٠٠ جملة متماثلة موضوعة في ظرف مزيج من ٩٠٪ و ١٠٪ تتحول كلها إلى مزيج من ٥٠٪ و ٥٠٪ ولا نرى مثلاً ولو تحولاً واحداً إلى مزيج من ٩٩٪ و ١٪ ؟ وبتعبير آخر ، لماذا تتغير الأنتروبية في كل هذه الجمل تغيرات متوازية ؟

لندقق ، كخطوة أولى على طريق حل هذه المفارقة ، في الفرق المجهري من حيث ظرف الغاز بين البدء والنهاية . فمن المرجح كثيراً أن جزيئات الغاز في البدء ، لحظة خروج الحاجز ، تتحرك فوضوياً . فاذا كان الأمر كذلك فان الجزيئات ستدمر الترتيب القائم ، الذي هو مزيج ٩٠٪ و ١٠٪ . أما في نهاية التجربة ، عندما يتوطد التوازن في مزيج ٥٠٪ و ٥٠٪ ، فتكون الحال مختلفة جداً . فاذا ألقينا نظرة إلى الوراء نرى أن الجزيئات اللا مرتبة قد أتت بالضبط من حالة أكثر ترتيباً . إنها ، في « الزمن المعكوس » لا تتحرك فوضوياً بل وفق مخطط يربط فيما بينها بترتيب مزيج من ٩٠٪ و ١٠٪ . على أن الأمر مختلف تماماً في التجربة الثانية المنطلقة من مزيج ، ٥٠٪ و ٥٠٪ ، باق دون تغيير ؛ إذ لا فرق هناك بين الطرفين الزمنيين للتجربة .

فالتناظر الزمني للعملية الخارجية وهم إذن . وعلينا أن نبحث عن كيفية تشكيل المزيج المرتب ، ٥٠٪ و ٥٠٪ . فلو كان قد تشكل بتفاوت عرضي فلنا أن نتوقع باحتمال مساو أن ينتهي المزيج إلى ٩٠٪ و ١٠٪ بدءاً من ٥٠٪ ، و ٥٠٪ ، شرط أن يحدث خروج الحاجز ودخوله بصورة عشوائية طبعاً . وعلى كل حال ، إذا وضع الغاز في الصندوق ، بحالته المرتبة ، قبل التجربة فان التناظر الزمني ينكسر . فاذا اشترطنا أن يكون ظرف الغاز في بدء التجربة عشوائياً ، فان تزايد الأنتروبية المحتوم يتحقق باحتمال عال .

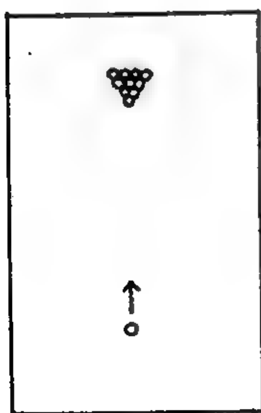
والآن تبرز تساؤلات عديدة . لماذا يتيح العالم الخارجي للمزيج اللا متوازن ، ٩٠٪ و ١٠٪ ، أن يتحقق ؟ لماذا تتشكل الجمل الفرعية في حالات أنتروبية منخفضة ؟ وفوق ذلك ، ما هو منشأ العشوائية البدئية للحركات المجهرية في هذه الجمل الفرعية ، وهي أساسية لحتمية اللا تناظر الزمني في سلوكها . إن هذه القضايا الساحرة ، في سبب كون العالم في حالة لا توازن ترموديناميي في بدئه وفي كيفية اكتساب مكوناته المجهرية حركاتها العشوائية ، قضايا جدلية تنتمي جوهرياً إلى موضوع علم الكونيات الذي سنعالجه في الفصلين الخامس والسادس .

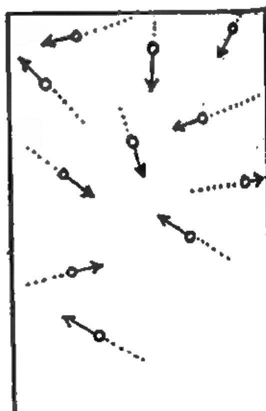
وبانتظار ذلك ، يوجد قضية لم تنته بعد . لقد افتُرض أن الجمل الفرعية التي انفصلت عن بقية العالم الأوسع هي جمل معزولة . إن هذا وهم . فالافتراض بأن نموذج بولتزمان معزول كلياً عن العالم الخارجي بواسطة وعاء موصد وكتيم كان لأسباب تبسيطية . فمثل هذه الأوعية غير موجودة في عالم الواقع . ولئن كانت بعض المواد عوازل جيدة ضد الحرارة ، إلاّ أن ذرات جدران الوعاء تبقى بتماس مع العالم الخارجي ، مما يمكن أن يتيح لتأثيرات العالم الخارجي أن تتسرب عبر هذه الجدران ناقلة معها اضطراباته إلى جزئيات الغاز المحتواة في الوعاء عندما تصطدم بجدرانه . وإن تغاضينا عن هذا فلا مجال للتغاضي عن القوى الثقالية الناشئة عن العالم الخارجي والتي لا يمكن التخلص منها . وفوق هذا وذاك فانّ غالبية الجمل الفرعية ليست حتى محصورة في صندوق عازل . وعلى هذا فلابد من معرفة إلى أي مدى تذهب هذه التفاعلات ، بين الجملة المدروسة والعالم الخارجي ، في التأثير في المحاكمات التي سقناها بخصوص الجمل الفرعية واللا تناظر الزمني .

ففي المجال المجهري تؤدي هذه الاضطرابات ، التي لا يمكن التنبؤ بكيفيتها ، إلى تدمير عكوسية الجملة . وهذا موضح في الشكل ٣ ـ ٦ الذي يمثل طاولة بليار ومجموعة من كراتها . الكرات تمثل الغاز والطاولة تمثل الوعاء . نهمل الاحتكاك ليكون التشبيه قريباً من الواقع . نعتمد في لحظة البدء كرات مرتبة كما في الشكل (a) ، أي مجمعة كلها في مثلث مرصوص ، ما عدا الكرة الضاربة التي تتجه نحو المثلث . فبعد لحظات قليلة يصبح وضع الكرات كما في (b) ، وهو وضع أقرب إلى الفوضى في مواقع الكرات وحركاتها لأنها ، بعد صدم الكرة الضاربة لها ، تنطلق في اتجاهات شتى وتتراطم بعضاً على بعض وعلى جدران

الطاولة . انها صورة تجسد المبدأ العام في تزايد الأنتروبية : فالحالة (a) المرتبة جداً قد أدت إلى الحالة (b) الفوضوية . ومعلوم أن التحول من (b) إلى (a) صعب جداً . ولا يمكن أن نأمل في إمكانية حدوثه إلاّ إذا انعكست حركات الكرات كلها دفعة واحدة ، ولنقل بفعل حواجز قاسية توضع دفعة واحدة وفي أوضاع مناسبة تجبر كل كرة على أن ترتد على أعقابها سالكة طريقها الأولي بالذات . ولو اشترطنا أن تكون جدران الطاولة قاسية جداً فان الكرات ستعود في النهاية فعلاً إلى المثلث الأولي وتعود الكرة الضاربة إلى موضعها الذي كان . إن هذا شيء يؤكده التناظر الزمني الذي تنطوي عليه قوانين الميكانيك .

شكل ٣ ـ ٦ . من الترتيب إلى الفوضى . إن هذا الانتقال الشائع يمكن أن تُعكس جهته بفعل عفريت ماهر قادر على أن يعكس اتجاه حركة الكرات كلها دفعة واحدة . عندئذ تعود الكرات من الوضع (b) إلى الوضع (a) . كيف « تتعرف » الكرات على طرق عودتها ؟ إن الجملة مغلقة ؛ فكل المعلومات عن الحالة (a) ما تزال كامنة في مواقع وحركات كل أفراد الكرات وهي في الحالة (b) . لكن لو كانت جدران الطاولة غير قاسية ، بل طرية قليلاً ، فانها ستدمر العكوسية السهلة العطب .





يمكن ، في هذا الشأن ، أن نأخذ بعين الاعتبار تأثير اضطرابات العالم الخارجي بافتراض أن حروف طاولة البليار ، التي تمثل جدران الوعاء ، ذات ارتجاج عشوائي ضعيف . وبتكرار التجربة تكسر الكرة الضاربة المثلث . وبعد لحظات ينجم وضع يختلف الآن عن (b) ، لأن كل كرة يمكن أن تكتسب ، من جراء ارتطامها بالحافة المرتجة ، دفعة إضافية أو أن تفقد شيئاً من عزمها . لكن النسق الجديد هذا سيكون على كل حال مشابهاً لـ (b) من حيث الفوضوية والانتشار العشوائي على صفحة الطاولة . ومع ذلك يظهر الفرق بين هذه الحالة والحالة (b) عندما نحقق شروط المعكوسية السابقة بسبب ارتجاج حواف الطاولة ، لأن الكرة ، وهي راجعة على أعقابها ، لا تسلك طريقها الأولي بالذات ، إلا قبل أن تصطدم بالحرف ، أما بعد ذلك فإن هذا الاصطدام ، على طريق العودة ، سيختلف عموماً عن الاصطدام الذي سبقه على الطريق الأولي ، ورغم ضآلة هذا الاختلاف فإنه يكفي لتغيير نسق الحركة كله . ولما كان الشكل المثلثي المرسوم في (a) ذا ترتيب جيد جداً فإن أقل اضطراب يطرأ على الحركات المعكوسة سيجعل بعض الكرات تصل متأخرة عن مواعيد اصطداماتها بسواها فتفشل كلها في اعادة تركيب المثلث الأولي بالضبط .

إن قدرة الجملة الميكانيكية المعزولة كلياً على العودة إلى حالتها الأولية عبر ظروف حركية معكوسة تنم عن تعبير جميل يقول : إن الجملة «تتذكر» ظرفها الأولي . وقدرة الكرات على إيجاد طريق عودتها تتوقف على احتوائها على كل المعلومات اللازمة لتعيد صنع ترتيبها السابق . وهذه المعلومات تبقى في الجملة طالما بقيت الجملة معزولة عن العالم الخارجي . وبمجرد أن يتدخل ارتجاج جدران الطاولة العشوائي فإن هذه المعلومات تتسرب الى العالم الخارجي وتضيع فيه . ولكي تنجح العملية المعكوسة في هذا الحالة علينا أن نقتفي آثار الصدمات فيما بعد حدود الجملة وأن نتدبر الأمر لكي نعكس أيضاً الاضطرابات الضعيفة التي يسببها ارتجاج حروف الطاولة . إن «فقدان الذاكرة» الضئيل هذا يجعل الجمل الواقعية لا عكوسة والزمن لا تناظرياً .

يطلق في نظرية المعلومات على هذه الاضطرابات العشوائية اسم الشغب أو الضجيج . وفي كل جملة واقعية يوجد شغب ناجم عن اتصال الجملة بالعالم الخارجي .

ونحن لم نأخذ بعين الاعتبار هذا «الشغب الكوني» في مناقشة نظرية بولتزمان ، ولا حتى في الجمل الفرعية التي لايظهر سلوكها اللاتناظري الزمني متوقفاً على الاتصال الضعيف المستمر بالمحيط الخارجي ، بل يتوقف فقط على المداخلات الفجائية العنيفة للعالم الخارجي في أثناء عملية التشكل .

وقد يقال إن اللا تناظر الزمني الذي يبديه تطبيق نظرية بولتزمان على الجمل الفرعية وهم زائف . فنحن لا نقول إن مزيج الغازين بنسبة ٥٠٪ ، ٥٠٪ ، في الشكل ٣ ـ ٣ ، أقل ترتيباً من المزيج ٩٠٪ ، ١٠٪ إلا لأننا لانستطيع مشاهدة حركات جزئيات الغاز واحدة واحدة . فاللا تناظر الزمني الذي ينجم عن امتزاج الغازين ليس سوى نتيجة لضيق أفق الاحساس البشري . وعلى هذا مازال بعض الناس يتمسكون بفكرة أن اللا تناظر وهم ذاتي تماماً تمليه محدودية الاحساسات البشرية ، وليس واقعاً من حقائق الطبيعة . وقد ادعى أن اللا تناظر الوحيد «الحقيقي» هو ذلك الذي تسببه الاضطرابات العشوائية المستمرة للشغب الكوني ، لأنها تسبب لاعكوسية «حقيقية» في المستوى الذري .

لنفترض أن غازاً قد مر الآن من ٩٠٪ ، ١٠٪ الى ٥٠٪ ، ٥٠٪ . إن فحص الحالة النهائية لا يتيح لنا أن نؤكد أن المزيج كان قبل قليل بنسبة ٩٠٪ ، ١٠٪ لأن أي حالة سابقة (بما فيها حالة التوازن) ستتحول بعد فترة وجيزة الى ٥٠٪ ، ٥٠٪ كما رأينا . ففي مجال الفحص المحسوس تضيع المعلومات عن الحالة البدئية . أما في المجال المجهري فإن المعلومات ماتزال موجودة محتواة في الحركات الفردية لجميع الجزيئات ، شرط أن تبقى الجملة في حالة انعزال كلي طبعاً . وهذا يتضمن ، بموجب هذه المحاكمة ، أن الجملة المعزولة كلياً لا تصل أبداً الى حالة توازن صحيح وأنه لا يوجد لاتناظر «حقيقي» .

وكجواب على وجهة النظر البديلة هذه علينا أن نتساءل عما إذا كان لكل هذا التمييز بين التوازن «الظاهري» و «الحقيقي» واللاتناظر الزمني شأن يذكر . فأي غازين غير ممتزجين في البدء سيستمران يقيناً بالامتزاج سواء وجد الشغب الكوني أم لم يوجد . وإن المطلوب هو تفسير هذه الظاهرة ، وهذا ما تتيحه نظرية بولتزمان مع افتراض التشكل العشوائي لجمل فرعية . فوجود اللا تناظر «الحقيقي» ، بالشكل الذي يمكن أن يعزى الى الشغب الكوني ، لايبدو ذا تأثير عميق جداً في الفيزياء . فخبرتنا الشخصية المحسوسة بالعالم ،

والتي تنطوي على شعور واضح باللاتناظر ، تتفسر جيداً بالآلية الأولى حتى ولو كانت مجرد وهم في المجال الذري . والاعتراض على ذلك اعتراض فلسفي صرف لايبدو ذا شأن كبير في الفيزياء .

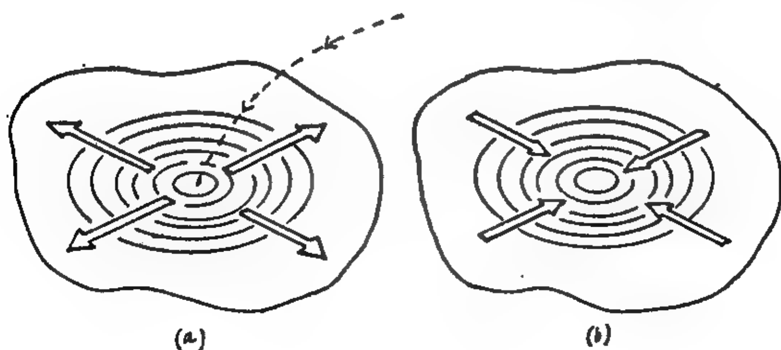
٣ ـ ٥ اللاتناظر الزمني والحركة الموجية

لم نعالج في هذا الفصل حتى الآن سوى الأساس الترموديناميكي للاتناظر الزمني . على أن هناك عمليات أخرى مهمة لاتناظرية يبدو أنها لاتتعلق مباشرة بعلم الترموديناميك من حيث توصيفها ، رغم أن تفسير اللاتناظر فيها يمكن أن يتصل باللاتناظر الترموديناميكي في أعماقه .

نسوق ، كمثال شائع على هذه الظواهر ، اللاتناظر الذي نصادفه عندما نلقي حجراً في بحيرة . نرى عندئذ اضطراباً يأخذ شكل موجة دائرية تنتشر من نقطة سقوط الحجر نحو شط البحيرة . إن الصورة المعكوسة زمنياً ، أي التي تتمثل باضطراب دائري ينشأ تلقائياً من الشط ويضيق متقارباً من نقطة ينطفىء فيها ، لاتحدث بتاتاً .

إن اللاتناظر في الحركة الموجية يظهر في العديد من فروع الفيزياء ، في انتشار أمواج

شكل ٣ ـ ٧ . الحركة الموجية المتأخرة ، والمتقدمة . الحجر الملقى في بحيرة هادئة يسبب اضطراباً يسافر صوب الخارج ، ويسمى موجة متأخرة (a) . أما الموجة المتقدمة (b) ، أي الاضطراب الذي يأتي من تضافر شتى المناطق البعيدة من البحيرة لتوليد اضطراب دائري يتقدم نحو المركز ، فاحتمال لا نصادفه البتة .



الراديو مثلاً . فالاشارة الراديوية تُستقبل ، في كل حال ، بعد إرسالها لا قبله . أي أن أمواج الراديو تنطلق من هوائي البث الى الفضاء المحيط ، لا في الاتجاه المعاكس بتاتاً .

إن صورة الحركة الموجية التي نصفها هنا ، حيث يتحرك الاضطراب نحو خارج المنبع ، تسمى الحركة الموجية المتأخرة لأن الاضطراب يبلغ النقاط البعيدة متأخراً عن لحظة حدوثه بسبب الفترة الزمنية التي يستغرقها الانتشار عبر الفضاء . أما الحادثة المعكوسة زمنياً ، التي تتمثل بنشوء موجة دائرية قرب ضفاف البحيرة قبل أن تتقارب نحو المنبع ، فتسمى الموجة المتقدمة . إن العجيب في هذا الأمر أن قوانين انتشار الأمواج تبيح حدوث هذه الموجة أو تلك على حد سواء . فحل معادلات مكسويل في انتشار الأمواج الكهرطيسية ، مثلاً ، يتضمن حدوث هاتين الموجتين دون تمييز . لكننا نستبعد إمكانية الحل المتقدم بحجة أن الظروف لا تلائم ظهور موجة تتولد على مسافات بعيدة ولتجمع نحو نقطة واحدة . ولكن لماذا لاتحدث هذه الظروف ؟ لقد عجز الفيزيائيون عن الاتفاق على جواب عن هذا السؤال .

لنتأمل أولاً في وضع يبدو أن فيه جواباً واضحاً . ففي حالة البحيرة تكون الجملة التي ندرسها ذات امتداد محدود . فاذا فكرنا بمحاكاة شبيهة بتلك التي أجريناها على نموذج بولتزمان الغازي ، نفترض أننا أمام نموذج بحيرة معزولة عن العالم الخارجي ومعزولة أيضاً عن العوامل الترمودينامية ، كاللزوجة التي تسبب تخامد الموجة وما إلى ذلك مما يمكن أن يعقد الموضوع . ففي هذه الجملة المثالية يمكن أن تحدث كل أنواع الأمواج بما فيها ، بعد زمن يطول أو يقصر ، الحركات الموجية المتقدمة المتقاربة . لكن الأكثر حدوثاً هي الاضطرابات السطحية الفوضوية واللا مرئية ـ أي ظرف «الأنتروبية العالية» ـ التي يمكن أن نعتبرها حالة توازن للبحيرة .

يكاد لا يختلف هذا في شيء عن جملة بولتزمان التي يمكن أن يحدث فيها اتفاقاً كل أنواع الحركات الجزيئية والتي تنزع مع ذلك دوماً الى الاقتراب من ظرف التوازن الفوضوي . وقد لا نستغرب التشابه بين هاتين الجملتين ، الغاز والبحيرة . فنظرية الكم تخبرنا أن حركة الذرات ، في كلتا الحالتين ، ذات مظهر موجي .

إن البحيرة المعزولة تتصرف بتناظر زمني لايختلف عن مثيله في الغاز المحصور في

الصندوق . على أن البحيرة ليست معزولة في الواقع . وعندما نرمي فيها حجراً جاء من خارجها نصنع جملة فرعية ، كما نفعل تماماً عندما نضع مكعب جليد في ماء يغلي . ومرة أخرى نقول : إذا ألقي الحجر عشوائياً فستوجد موجة متأخرة باحتمال عظيم ، لأن من مثل الأكيد أن لا يحدث على الضفاف ، لحظة وصول الاضطراب بالضبط ، تفاوت يجعل الموجة ترتد على أعقابها بالضبط والتمام .

إن اعتبارات الجمل الفرعية تتحطم ، لسوء الحظ ، عندما يكون حجم الجملة لا متناهياً في الكبر . فلو فتحنا صندوق الغاز على الفضاء اللا متناهي الخالي فإن الغاز يتشتت فيه دون عودة . وموجة الراديو التي تسافر في الفضاء اللا محدود ولا تصادف «ضفاف البحيرة» لن تعود أبداً . إن تشتت الجسيمات والأمواج هذا ، هو ، من الحوادث اللاتناظرية زمنياً ، نوع جديد يستدعي تعليلاً جديداً . ومن الواضح أن مثل هذا التفسير لا يمكن أن يعتمد على اعتبارات موضعية . فالذي يجب أن نشرحه هو لماذا لا تحدث في مناطق العالم النائية ظروف تجعل أمواج الراديو وجزيئات الغاز تهرع كلها معاً لتتركز في حيز صغير . إن التفكير في مثل هذه الحوادث الغريبة ، كرجوع أمواج الراديو على أعقابها من تخوم الفضاء الكوني ، قد يبدو للقارىء أمراً مضحكاً بكل بساطة ، كما يبدو البحث عن تعليل عدم حدوثها مهمة فارغة . لكننا سنرى أن نتائج هذه الدراسة يمكن أن تفرض قيوداً صارمة على العالم الذي نعيش فيه . وسنرى فوق ذلك أن بعضاً من النماذج الكونية ، التي يمكن أن تتضمن شبهاً مع عالمنا ، قد تتيح فعلاً حدوث مثل هذه الأمور المضحكة من وقت لآخر .

إن التمحيص في أصل تشكل الجمل الفرعية ، وفي لا عكوسية (اللاتناظرية الزمنية) الحركة الموجية ، قد أفضى الى اعتبارات تتناول خصائص العالم الكوني بأبعد مداه . وقبل أن نسوق تعليلات مقنعة لهذه الأمور (في الفصل السادس) لابد من شرح ما هو معلوم عن أصل هذا العالم وعن بنيته وعن تطوره . وفي سبيل ذلك نشرح أولاً طبيعة الثقالة .

٤ ـ ١ الفيزياء من حركة سقوط الأجسام .

إن نسبية الحركة المنتظمة ، وهي تشكل حجر الأساس في ميكانيك نيوتن كما في نسبية آينشتاين ، تعتمد في أعماقها على وجود مرجع مقارنة عطالي . وكل المراجع المتحركة بالنسبة لأحدها بسرعة منتظمة تعتبر متكافئة ميكانيكياً في هاتين النظريتين . ولا تتجلى الفروق الفيزيائية داخل الجملة المتحركة إلا بالحركة المتسارعة . وبموجب قانون نيوتن الثاني (١ ـ ١) (وكذلك بالتالي تعميم آينشتاين) لا يمكن إزالة التسارع والعودة الى الحركة المنتظمة إلا بإزالة فعل كل القوى المتسلطة على الجملة . فوجود جملة عطالية يتوقف إذن على مهارتنا في القدرة على صنع حالة حركية حرة من أي تأثير ، مبدئياً على الأقل .

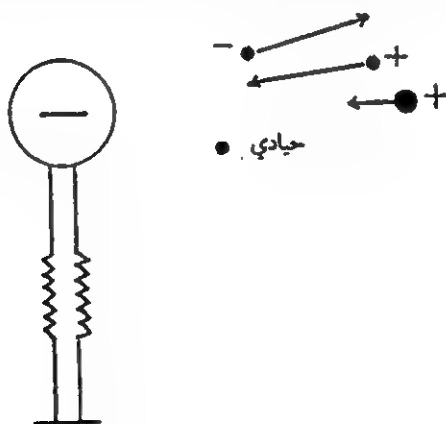
إن الفيزياء الحديثة تقول بوجود أربع قوى طبيعية ، أشدها ـ وتسمى عادة التفاعل الشديد ـ تفعل على مدى قصير جداً ، من رتبة ١٠⁻¹³ سنتيمتر ، بين الجسيمات المكونة لنواة الذرة ، وهي المسئولة عن «ارتصاص» النواة ، وهناك قوة أضعف ـ التفاعل الضعيف ـ تعمل على مدى قصير أيضاً ضمن الجسيم الذري الواحد ، وهي المسئولة ، من جملة أفعالها ، عن النشاط الاشعاعي بيتا . ولا تأثير لأي من هاتين القوتين على حركة الأجسام المحسوسة ، وقد كانتا مجهولتين عندما اكتشف آينشتاين نظرية النسبية .

أما القوتان الأخريان فهما القوة الكهرطيسية وقوة التثاقل ، وكلتاهما تؤثران في الأجسام المحسوسة . ولا يمكن أن تحدث حركة عطالية (منتظمة) بوجود واحدة من هاتين القوتين . لنبحث إذن كيف يمكن للمرء أن يعلم فيما إذا كانت جملة معينة حرةً من مثل هاتين القوتين . إن الجسيمات المشحونة بالكهرباء تتسارع في الحقل الكهربائي بما يتناسب عكسياً مع كتلها ، وبذلك يمكن الاستدلال على وجود الحقل الكهربائي . والجسيمات المشحونة ايجابياً تتحرك بعكس اتجاه حركة الجسيمات المشحونة سلبياً . أما الجسيمات الحيادية كهربائياً (كالذرات العادية لأنها تحوي عددين متساويين من الشحنات الموجبة والسالبة) فلا تتسارع في الحقل الكهربائي . ونعلم أن الجسيمات المتساوية بالشحنة يقل

تسارعها كلما كبرت كتلتها لأن عطالتها تكبر . يمكن إذن تحرير الجملة من القوى الكهربائية ، إما بجعلها حيادية كهربائياً أو ذات كتلة كبيرة جداً ، أو بتعبير آخر ، بإنقاص نسبة الشحنة الكهربائية على الكتلة العطالية الى قيمة مهملة . فتحرر الجملة من القوة الكهربائية يمكن التحقق منه مباشرة بالاعتماد على أرصاد تتناول الجسيمات المشحونة واللامشحونة .

أما في حالة التثاقل فإن هذه الخطة فاشلة تماماً . فحركة جسيمات الاختبار بتأثير ثقالة الأرض تحدث كلها نحو الأسفل . ولا يوجد مادة معروفة تنفر نحو الأعلى . فالثقالة تجاذبية دوماً بين الأجسام . ونعبر عن ذلك أيضاً بالقول : إن كل الشحنات الثقالية من إشارة واحدة ، وذلك بخلاف الشحنات الكهربائية التي هي إما موجبة وإما سالبة ؛ والثقالة المضادة ، بالمعنى المباشر ، لا توجد إلا في قصص الخيال العلمي . ورغم ذلك فإن من

شكل ٤ ـ ١ . الحركة بفعل القوى الكهربائية . إن الجسيمات المتروكة في حقل كهربائي تختلف حركاتها . إن الكرة المشحونة سلبياً تجذب الشحنتين الموجبتين المتساويتين بقوة واحدة لكن أخفها تكتسب التسارع الأكبر لأنها الأقل عطالة . يمكن أن نجعل نسبة الشحنة على العطالة تتغير كثيراً أو تنعدم (الجسيمات الحيادية لا تتأثر) وحتى تصبح سالبة (ينفر الجسيم عن الكرة) . فوجود حقل قوى كهربائية يمكن الاستدلال عليه دوماً وفي أية نقطة من الفضاء ومهما كانت حالة الراصد الحركية وذلك باستخدام جسيمات اختبار من أنواع شتى .

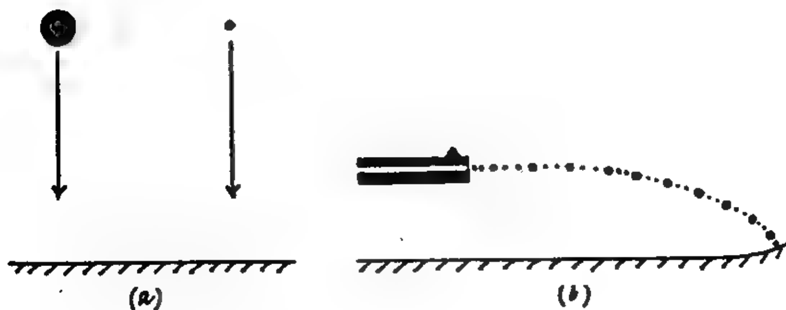


المعروف أن وجود قوى ثقالية ، متسلطة على جملة ما ، يتجلى بتسارعات تختلف عموماً من جسم لأخر ويمكن صنع جملة حرة من مثل هذه القوى إذا جعلنا نسبة الشحنة الثقالية / الكتلة العطالية صغيرة لدرجة الاهمال .

إن التسارع الذي تكتسبه الأجسام المختلفة يمكن تعيينه بتركها تسقط في حقل الثقالة الأرضي . ويقال إن غاليله قد أتم هذه التجربة على أجسام تركها تسقط من قمة برج بيزا المائل . وهو على كل حال كان أول من اكتشف المبدأ الذي لا يقل أهمية عن نتيجة تجربة مايكسلون ومورلي والذي يقول : إن كل الأجسام تسقط بتسارع واحد . وقد رأى أكثر الناس في هذه النتيجة أمراً لايُصدق . فقد كانوا يظنون أن الأجسام الثقيلة أسرع في سقوطها من الأجسام الخفيفة . هذا رغم أن الأجسام الثقيلة أعظم عطالة وبالتالي أصعب تحريكاً . وبذلك اكتشف غاليله أن هاتين الخاصتين ـ كون الجسم أثقل وكونه أعظم

شكل ٤ ـ ٢ الحركة بفعل قوى الثقالة . إن كل الجسيمات تسقط في حقل التثاقل بأسلوب واحد ففي (a) يصل الجسمان، الثقيل والخفيف، إلى الأرض معاً وفي (b) تطلق القذيفتان ، الثقيلة (النقط الكبيرة) والخفيفة (النقط الصغيرة) ، بسرعة واحدة. إن لهما مساراً واحداً . إن هذه النتائج صحيحة على سطح الأرض ولكن بصورة تقريبية بسبب مقاومة الهواء .

إن وجود الثقالة لايمكن الاستدلال عليه في نقطة من الفضاء بواسطة جسيمات اختبار مختلفة تترك لشأنها . فالمساران المنحنيان في (b) يمكن أن ينجما ، على حد سواء ، من جذب الثقالة نحو الأسفل أو من حركة الراصد نحو الأعلى .



عطالة ـ تعدِّل إحداهما أثر الأخرى بالضبط والتمام . فالثقالة تجذب الحجرة الكبيرة بأشد مما تجذب الحصاة الصغيرة ، لكن الحصاة تستجيب بأطوع مما تستجيب الحجرة . ونتيجة ذلك أن كلتيهما تسقطان متصاحبتين فتصلان الى الأرض معاً ، وهذا مايمكن للقارىء أن يتحقق منه بسهولة (انظر الشكل ٤ ـ ٢) . ولئن كانت ريشة الطائر أو نُفّاخة الطفل المطاطية تبدوان عملياً مناقضتين لمبدأ غاليله فما ذلك إلا بسبب مقاومة الهواء ، وهي مستقلة عن طبيعة الثقالة . لقد كان ذلك من أعظم انجازات غاليله ـ وهو التفريق بين خاصية التثاقل العامة الهامة وبين مقاومة الهواء التي هي ، على بدهيتها ، غير ذات شأن في هذا الصدد .

إن نتيجة غاليله هذه قد جرى امتحانها بعد ذلك لدى أُتفوس R.von Eötvös (هنغاري ١٨٤٨ ـ ١٩١٩) عام ١٨٨٩ ومؤخرا لدى ديك R.Dicke عام ١٩٦٤ بدقة لا تتجاوز واحداً من مليون مليون . وربما كان خير تعبير عنها هو أن نقول إن نسبة الشحنة الثقالية على الكتلة العطالية ثابتة ، أي مستقلة عن طبيعة الجسم الساقط . والواقع أن الشحنة الثقالية والكتلة العطالية هما خاصتان فيزيائيتان متكافئتان من خواص أي جسم . ولهذا السبب يطلق على هذه النتيجة اسم مبدأ التكافؤ . وهذا المبدأ يقضي بشكله العام بأن كل «جسيمات الاختبار» تتحرك على المسار نفسه بفعل الثقالة[1] . وعلى هذا لايوجد طريقة تتيح لنا أن نكتشف ، من خلال فحص السلوك الموضعي لأي جسيم اختبار ، وجود الثقالة . إذ لا يوجد أشياء حيادية ثقالياً لتصبح حرة من تأثير الثقالة ولكي نستطيع أن نقارن جملتنا المدروسة بحركتها لنعلم إن كانت حرة من القوة الثقالية .

وقد يكون أقرب الى الادراك أن نجد لمبدأ التكافؤ تعبيراً أكبر نفعاً إذا تذكرنا أن الشحنة الثقالية تجسد كمياً قوة الثقالة ، بينما تجسد الكتلة العطالية كمياً قوى العطالة الناشئة عن الحركة المتسارعة . إذ يصبح عندئذ التطابق بينهما تعبيراً عن تكافؤ فيزيائي بين القوى الثقالية والقوى العطالية . وهذا التكافؤ معروف بالخبرة . فالقوة النابذة الفاعلة في الجسم الدوار لا يختلف الاحساس بها عن الاحساس بقوة الثقل (اللهم إلا أن تكون أفقية) . والواقع أن عبارة «الثقالة المصطنعة» كثيراً ما تُستعمل لدى علماء الفضاء الذين

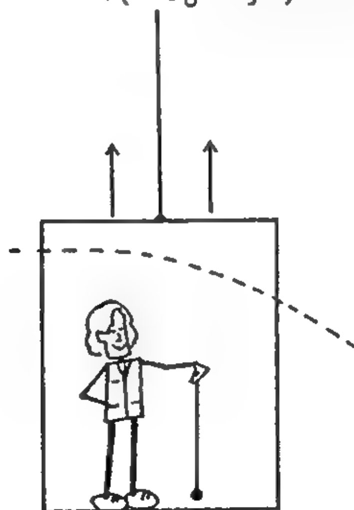
---

(١) نقصد بـ «جسيم الاختبار» هنا جسيماً صغيراً لدرجة يمكن معها إهمال أثر جاذبيته الخاصة على الحركة .

يرون استخدام محطات فضائية دوارة لتوليد ثقالة ، فيمتهاج" مـ محيط المحطة ، تتيح أن يعمل قاطنوها في ظروف مألوفة . والنبذ الدوراني طريقة مر ـ ـ ولبد «جيهات» عالية جداً .

شكل ٤ ـ ٣ . مبدأ التكافؤ . الصندوق يتحرك نحو الأعلى ـ ـ مبدأ في فضاء تُهمل فيه جاذبية الأرض الثقالية . إن قاطنه يشعر بوزنه العادي ولا يسـ عرما بأنه ليس في حالة سكون على الأرض . إن أرصاده الأخرى الموضعية تبدو عـ محيط المطهار يتدلى نحو أرضية الصندوق ، والرصاصة (التي تتحرك في الواقع على خط ـ مم سرعة ثابتة) تبدو له داخل الصندوق ذات مسار منحن نحو الأسفل . إن قور محصلة الناجمة عن التسارع تكافىء ، موضعياً (أي ضمن حجم الصندوق) ومن جميع الوجوه ، قوة الثقالة . لكن الأرصاد الجارية في الجوار الأوسع تكشف عن وجود فروق . إن الثقاله ـ مه عن وجود أجسام مجاورة (كالأرض مثلاً) بينما القوى العطالية لا شأن لها بهذه الأجسام

لاحظ أن الخط المتقطع يمكن أيضاً أن يمثل مسار شعاع ضوئي ، مما يوحي بأن الضوء ينحني أيضاً بفعل الثقالة (انظر الشكل ٤ ـ ٥) .

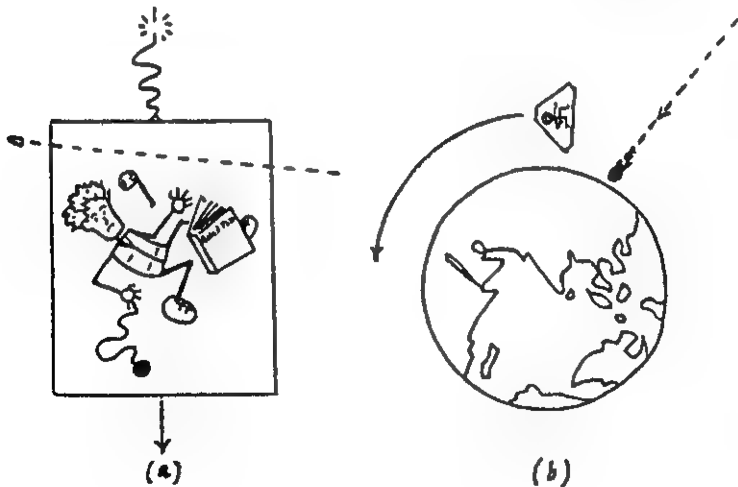


(٢) هو رمز للتسارع الناجم عن جاذبية الأرض ، وغالباً مايستعمل كمعيار لشدة الثقالة . (المترجم) .

وبالمقابل ، لايمكن التمييز موضعياً (أي في فضاء محدود) بين قوة الثقالة ومفعول التسارع . فالشخص الموجود في صندوق غير شفاف (انظر الشكل ٤ ـ ٣) عاجز عن معرفة اذا كان ساكناً على سطح الأرض أو متحركاً نحو الأعلى بتسارع ج في منطقة من الفضاء نائية عن الأرض بحيث يمكن إهمال جاذبيتها .

وهكذا ، فكما يمكن استخدام التسارع لمحاكاة قوة ثقالية ، يمكن التخلص من فعل الثقالة باستخدام التسارع . وهذا ظرف يمكن أن نخلقه في مرجع أتيح له أن يسقط حراً . فإذا كان الصندوق المذكور أعلاه في حالة سقوط حر من ارتفاع شاهق فإن القاطن

شكل ٤ ـ ٤ . مراجع تسقط حره . إن آثار التثاقل الموضعية تختفي (يُتخلص منها) في السقوط الحر بموجب مبدأ التكافؤ . في (a) يسقط الصندوق ومحتوياته نحو الأسفل بسرعة واحدة ، مما يجعل المحتويات تبدو للراصد عديمة الثقل . والأجسام المتحركة ، كالرصاصة التي تخترق الصندوق ، تبدو له سائرة في خط مستقيم . في (b) ، الراكب الفضائي الذي يدور حول الأرض هو أيضاً في حالة سقوط حر ، وبذلك يشعر بانعدام وزنه . وذلك أن تسارعه (الناجم عن انحناء مساره) يخفي موضعياً ثقالة الأرض . إنها ماتزال موجودة طبعاً بدليل جذبها للنيزك المار بجوارها .



المسكين لا يشعر بالثقالة أثناء سقوطه مع الصندوق ومحتوياته . فهو ، والأجسام الأخرى في الصندوق حوله ، تسقط كلها بأسلوب حركة الصندوق بموجب مبدأ التكافؤ . فغليونه الذي خرج من فمه ، مثلاً ، بفعل المفاجأة الأولى يظل مستمراً في مكانه على بضعة سنتيمترات أمام وجهه . فالمشهد الماثل لعين القاطن داخل الصندوق هو مشهد متحرر من ربق الثقالة يدع كل شيء عائماً ، فلا يتسارع بالنسبة للصندوق ولا يبدو له أي وزن . فالقاطن لا يستطيع إذن أن يكشف وجود الأرض وهو في حالة السقوط الحر هذه . لكنه سيعرف دون ريب كل شيء عن وجود الأرض عندما يرتطم الصندوق بقعر الهاوية وتنشأ قوى عنيفة غير ثقالية تولد تسارعات شتى في حطامه .

لابد أن مثل هذا الظرف لم يكن مألوفاً لدى (أحياء) البشر عندما لفت آينشتاين النظر إليه أول مرة . أما اليوم فمن النادر أن تصادف إنساناً لم يشاهد منظر انعدام الثقالة داخل مراكب الفضاء . فعندما ينفد وقود صاروخ المركبة تصبح المركبة في سقوط حر ولا يشعر ملاحوها بالثقالة . والثقالة مازالت موجودة بالطبع ، ومازالت محسوسة حتى في جوار القمر (وإلا فكيف يتسنى للقمر أن يلزم مداره حول الأرض ؟) لكن المرجع الساقط بحريته عاجز عن كشفها . وثقالة الأرض على مدار يبعد ٢٠٠ كيلو متر عنها تبلغ ٦٪ من شدتها على سطحها ، لكنها تختفي ضمن المركبة بفعل تسارع حركة المركبة وهي تدور على مدارها المنحني حرة في السقوط . وبصريح العبارة نقول : إن الثقالة المصطنعة في حركة الدوران حول الأرض توازن بالضبط ثقالة الأرض لينجم عنهما انعدام الوزن ، وهو السمة اللامألوفة التي تسود في رحلات الفضاء .

إن مبدأ التكافؤ بين المفعولين، الثقالي والتسارعي (العطالي)، يجب أن لايخدع القارىء فيظن أن الثقالة نوع من الوهم يتوقف على المرجع الذي يتفق أن نستعمله . فهذا المبدأ الذي نلح عليه كثيراً صحيح موضعياً فقط، وهذا مادعانا لقصر مثالنا على الصندوق المحدود . لكن الأرصاد التي تتناول مسافات عظيمة يمكن أن تكشف بسرعة وجود الثقالة . وهذا بسبب أن الثقالة تتغير من مكان لآخر . وعلى هذا يمكن أن نفكر فيها وكأنها حقل يشبه حقل مكسويل الكهرطيسي ، وهو حقل غير نسيق بل يتغير شدة واتجاهاً . وعلى هذا فإن الحقل الثقالي لا يكون نسيقاً (بصورة تقريبية) إلا في مناطق صغيرة من الفضاء .

فحقل ثقالة الأرض على مسافة نائية منها أضعف مما هو قرب سطحها ، والمركبة الفضائية التي تدور على علو ٢٠٠ كيلو متر تنجز دورة واحدة في نحو ساعة ونصف ، بينما يستغرق القمر ، وهو يتثاقل ببطء نحو الأرض وعلى علو ٤٠٠ ٠٠٠ كيلو متر ، ٢٨ يوماً كاملة . وبذلك يوجد تسارع نسبي كبير بين المركبة والقمر ، ومع ذلك يوجد ضمن حجم المركبة الصغير انعدام وزن ظاهري ، والملاح الفضائي ، الذي يستطيع رؤية حركة القمر بالنسبة للمركبة ، قادر إذن على استنتاج وجود حقل الأرض الثقالي (حتى ولو لم يستطع رؤية الأرض) . فالأرصاد التي تغطي مناطق واسعة من الحقل الثقالي تكشف وجود هذا الحقل . وتغير الحقل من منطقة الأخرى يسمى مفعول المد والجزر ، ذلك لأن التغيرات الطفيفة التي تطرأ على حقل الأرض من جراء تداخله مع حقل القمر الثقالي هي السبب في توليد مد وجزر مياه المحيطات . ولو كان القمر يسلط قوة ثقالية واحدة في كل مكان من الأرض لما كان له تأثير في مياه المحيطات .

إن مفعول المد والجزر في الصندوق الساقط مهمل لأن الصندوق أصغر بكثير من الأرض . ورغم ذلك فإن محتويات الصندوق لا تسلك في سقوطها مسارات متوازية بل تتهافت نحو مركز كرة الأرض . فهذه المسارات تتقارب إذن ببطء ، ولو كان للصندوق أن يستمر سقوطه في بئر جد عميقة لالتقت كل محتوياته في مركز الأرض . وهكذا ، ورغم ذهول القاطن أمام هذه الظاهرة ، فإن ثقالة الأرض يمكن اكتشافها ببطء شديد من رصد انجرار المحتويات البطيء نحو مركز الصندوق وهو يقترب من مركز الأرض . إن هذا المفعول صغير طبعاً ، والسقوط من ارتفاع مئة متر عن سطح الأرض يولد اقتراباً بين جسمين لايزيد عن بضعة أجزاء من ألف جزء من السنتيمتر إذا كانت المسافة بينهما لحظة بدء السقوط تساوي ثلاثة أمتار .

ولايجاز ذلك نقول : بينما يمكن اكتشاف الحقل الكهربائي بواسطة شحنات اختبار توضع في نقاط الحقل ، إلا أن تغيرات الحقل الثقالي من موضع لآخر هي وحدها التي تولد آثاراً فيزيائية يمكن اكتشافها .

وبالعودة الى موضوع المراجع العطالية نذكر أن نيوتن كان مدركاً جيداً للتكافؤ بين الشحنة الثقالية والكتلة العطالية . إلا أنه كان يفترض أننا لو تصورنا منطقة من الفضاء

نائية عن أي منبع ثقالي أو كهرطيسي وعن أية قوة أخرى ، فإن ظروفها تكون قريبة جداً من حالـة جملة عطالية حرة من القـوى . فالمراجع العطالية يمكن إذن صنعها ، مبدئياً على الأقل ، في كل نقطة من العالم بالرصد وبالمقارنة مع هذه الجملة النائية . فمفهوم المرجع العطالي مايزال ذا معنى واقعي ، لأن بالمستطاع توسيع المنطقة الحرة من القوى لتعم العالم كله اذا احتاج الأمر . (إن كلمة «صنع» مرجع عطالي يجب أن لاتؤخذ بمدلولها الحرفي الذي يعني بناء شبكة من القضبان المعدنية الصلبة أو شيء من هذا القبيل . إنها رطانة رياضية تدل على تشكيل احداثيات تلازم حالة حركية معينة) . وبذلك ، وبوجود شيء ناء يتحرك بانتظام في منطقة من الفضاء نظيفة من كل قوة ، فإن رصد حركته من الأرض لابد أن يكـون كافياً لتعيين درجه تسارع جملة على سطح الأرض ، تسارع تسببه كل القوى المتسلطة على الجملة ، بما فيها قوى الثقالة .

إن محاكمة نيوتن هذه لم تحظ بموافقة آينشتاين لأنه ، وبصرف النظر عن واقع أن الثقالة موجودة في كل مكان وناجمة بكل بساطة عن الحقل العام الذي تولده كل أشياء هذا العالم ، قد عرف من نظريته النسبوية الخاصة أن مقارنة الحالة الحركية الموضعية (مرجع المقـارنـة) بالجملة العـطالية النـائية لا يمكن إجراؤها كما كان يفترض نيوتن ، حتى ولا مبدئياً . وسبب ذلك هو التكافؤ بين الكتلة والطاقة ($E= mc^2$) ، وهو يقضي بأن الضوء ، كحامل طاقة ، يتمتع بكتلة ويعاني من حقل الثقالة كما يعاني الجسيم المادي . ولقد أمكن التحقق من انحناء الشعاع الضوئي في حقل الثقالة ، وهذه نبؤة مركزية من نبؤات نظرية آينشتـاين أحـرزت انتصـاراً مذهـلاً عنـدمـا قاس إدنغتـون A .Eddington (بـريطاني ، ١٨٨٢ ـ ١٩٤٤) انعطاف الأشعة الضوئية ، الآتية من النجوم البعيدة ، نحو الشمس أثنـاء كسـوفهـا عام ١٩١٩ ووجد القيمة التي حسبها آينشتاين في نظريته (انظر الشكل ٤ ـ ٥) . إن هذا الانحناء الواقعي للضوء بفعل الثقالة يدعو لاستبعاد استعمال الأشعة الضوئية لرصد حركة جملة نائية من موقع يعاني حقلاً ثقالياً ، لأن الأرصاد تكون عندئذ زائغة .

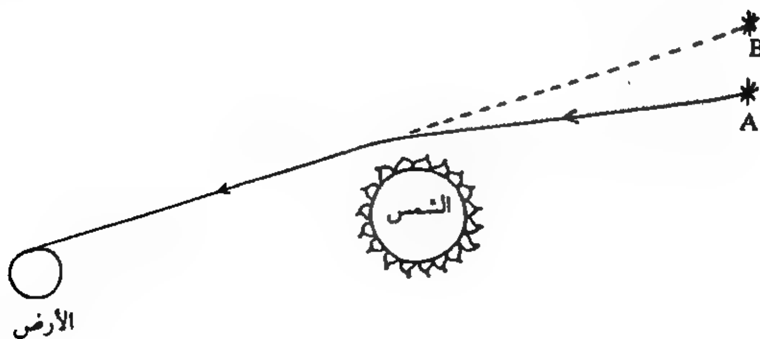
وبمحاكمات من هذا القبيل خلص آينشتاين الى القول بأن بنية المكان والزمان ، بعد أن انضما معاً في مبادىء نظرية النسبية الخاصة الجديدة ، لايمكن أن تدرس بمعزل عن

اعتبارات الثقالة ، ثم اضطلع بمحاولة بناء نظرية ثقالية جديدة تحل محل نظرية نيوتن التي كان العلم قد انتفع بها وبنجاح عظيم خلال قرنين من الزمان .

٤ ـ ٢ نظرية النسبية العامة وتشوه المكان ـ الزمان بفعل الثقالة

عندما اكتشف آينشتاين مبادىء النسبية الخاصة كان للقوتين الرئيسيتين المعروفتين آنئد ـ الكهرطيسية والتثاقل ـ وضعان مختلفان تماماً في تلك النظرية . وكانت الكهرطيسية النظير الفعلي للنسبية الخاصة التي نمت من خلال محاولة التوفيق بين سلوك الأمواج الكهرطيسية ، كالضوء ، وبين خصائص الأجسام المتحركة . وبنتيجة ذلك تبين أن الكهرطيسية تتفق تماماً مع مبادىء النسبية الخاصة . كما اتضح بالطبع وجوب استبعاد أثير مكسويل في التفسير الفيزيائي لظواهر الكهرطيسية ، لكن نظريته بقيت صحيحة في رياضياتها . بيد أن هذا الكلام لا ينسحب على نظرية نيوتن في التثاقل . فهذه النظرية تعتمد على الفعل الآني للقوة عبر المسافات ، ذلك المفهوم الذي أصبح مجرداً عن أي مدلول بعد اكتشاف نسبية التزامن التي تستند على محدودية سرعة الضوء . إذ كيف يمكن لتغير في جسم أن يؤثر آنياً في جسم آخر بعيد عنه إذا كانت كل أنواع التأثير الفيزيائية ممنوعة عن أن

شكل ٤ ـ ٥ . الضوء يتأثر بالثقالة . إن ثقالة الشمس تحني الحزمة الضوئية فيبدو النجم A من الأرض منحرفاً عن موضعه وكأنه في B . وهذا الانحراف يمكن رصده وقياسه أثناء الكسوف عندما يحجب القمر قرص الشمس كله ويتيح للمراصد أن ترى النجوم حول الشمس في وضح النهار .

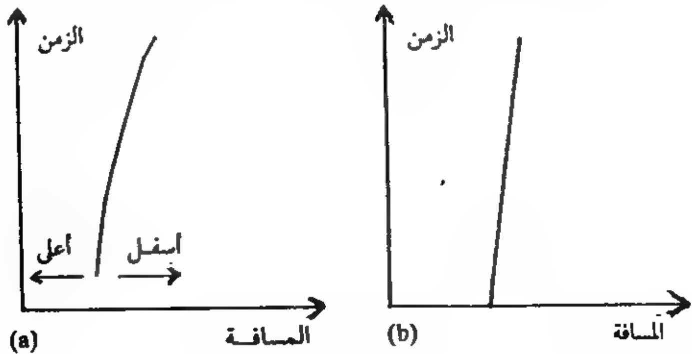


تنتقل بأسرع من الضوء ؟ ولأي مرجع مقارنة ننسب جملة «في آن واحد» ؟

وفي بحثه عن نظرية جديدة في التثاقل متفقة مع مبادىء النسبية كان آينشتاين يعتمد عدة خطوط موجهة . فهناك أولاً نظرية مكسويل الناجحة التي ينبع الحقل الكهرطيسي فيها من الشحنة الكهربائية التي لا تتغير قيمتها مهما كان المرجع الذي تقاس منه . أما كتلة الجسم ، وهي منبع حقل التثاقل ، فتختلف قيمتها باختلاف المرجع الذي تقاس منه ـ فالجسيم يصبح أثقل فأثقل لدى اقترابه من سرعة الضوء . فنوع الحقل الذي كان آينشتاين يبحث عنه أكثر تعقيداً من حقل مكسويل . وبينما يمكن لحقل مكسويل أن يسلط قوى في مناح مختلفة فإن حقل التثاقل يجب أن يتضمن مركبات أكثر عدداً . (كان نيوتن قد اقترح مركبة واحدة فقط للقوة ، مع حقل تثاقلي محمول دوماً على المستقيم الذي يصل بين مركزي ثقل الجسمين المتفاعلين) . هذا وإن العلاقة فيما بين هذه المركبات العديدة مستوحاة من مبادىء رياضية تخرج عن نطاق هذا الكتاب .

لقد أراد آينشتاين أيضاً أن يُدخل مبدأ التكافؤ الحاسم في سوية أساسية من نظريته ، لا أن يعتبره صدفة بحتة كما فعل نيوتن . وقد أنجز هذا العمل عام ١٩١٥ ونشر نظريته

شكل ٤ ـ ٦ . يمثل (a) خارطة مكان ـ زمان كما يرسمها ، للجسم الساقط ، راصد يقف على الأرض (لقد رسمنا الأعلى والأسفل أفقيين اصطلاحاً) . أما (b) فهي الخارطة التي يرسمها ، للجسم الساقط نفسه ، راصد في حالة سقوط حر . إن الثقالة ، بموجب مبدأ التكافؤ ، تختفي من جراء تسارع السقوط الحر ، مما يجعل مسار (الخط العالمي) الجسم الساقط يبدو مستقيماً .



الجديدة في التثاقل ـ نظرية النسبية العامة ـ بشكلها النهائي في ذلك العام . ولشرح النظرية العامة نعود الى مفهوم خارطة المكان ـ الزمان . فقد كان الاهتمام في النسبية الخاصة ينصب على الحركة المنتظمة التي تتمثل على تلك الخارطة بخطوط مستقيمة . فهذه الخطوط المستقيمة تشكل طائفة متميزة من خطوط عالمية (أي في فضاء منكوفسكي) تجسد الوضع الخاص للحركة العطالية في تلك النظرية .

أما بوجود الثقالة فلا يمكن صنع مراجع عطالية . كما أن الخطوط العالمية تنحني بفعل قوى التثاقل . على أن من الممكن (بتجاهل كل القوى غير الثقالية في هذه المناقشة) موضعياً أن نختار مرجعاً تكون فيه كل الخطوط العالمية المتجاورة مستقيمة ـ المرجع الساقط حراً . فسلوك الجسيمات المتجاورة يبدو من هذا المرجع ، كما رأينا ، حراً من الثقالة ، مما يجعل خارطة المكان ـ الزمان لما يحدث داخل الصندوق الصغير الساقط قريبة جداً من ظرف النسبية الخاصة ، مع إمكانية تحقيق تقريبي للحركات العطالية . بيد أن مثل هذه المراجع لا يمكن أن تُصنع إلا موضعياً . لكن كل خارطة مكان ـ زمان ممثلة لمنطقة فضائية واسعة تُظهر التسارعات النسبية الضعيفة للأجسام المفصولة بمسافات كبيرة ، كما تُرى من مرجع خاص يسقط حراً ، وذلك بسبب مفعول المد الجزر المذكور في الفقرة السابقة . ينتج من ذلك أنه مهما كان المرجع الساقط الذي نرصد المنطقة منه فإن الخارطة التي تصور مسار الجسيمات مفطورة على ظهور تشوه يزيد في ابتعاد المسار عن الخط المستقيم كلما اتسعت المنطقة التي نراقبها . ولما كان هذا التشوه لا يختلف من جسيم لآخر ، أي مستقلاً عن طبيعة الجسيم (بموجب مبدأ التكافؤ) ، فإن هذا يرحي ، أول مايوحي ، بأنه قد يكون من الأنسب أن ننظر الى التثاقل الذي يسبب تشوه خطوط الجسيم العالمية على أنه خاصة من خواص المكان ـ الزمان نفسه ، أكثر من أنه تأثير فُرض عليه .

إن من الممكن أن نرسم خارطة مكان ـ زمان بطريقة أكثر عمومية وبحيث يزول انحناء مسار الجسيم . وهذا يعود الى القول بأن الخارطة تمثل مايراه الراصد الساقط حراً في كل مكان ، ولا تقتصر على جملة خاصة موضعية ساقطة . وأسلوب هذا التعميم مستوحى من المقارنة مع الخرائط الأرضية العادية . فهناك تشوه معروف جيداً وسائد في خرائط الكرة الأرضية ويستفحل عند حواف الخارطة . فخارطة العالم المرسومة وفق إسقاط مركاتور لا

تمثل بالدقة والضبط سوى المنطقة الاستوائية من سطح الأرض . لكن خطوط الخارطة تتشوه أكثر فأكثر كلما تزايد الاقتراب من أحد القطبين . إن هذه التشوه يستفحل كثيراً عند غرينلاند والقارة القطبية الجنوبية اللتين ترتسمان ممتطتين بالاتجاه الأفقي أكثر بكثير مما هما في الواقع . وسبب هذا التشوه معروف طبعاً . فهو ببساطة ناجم عن أن سطح الأرض كروي ، وليس بالمستطاع تمثيل سطح منحن على خارطة منبسطة دون تشوه . لكن إزالة هذا التشوه تصبح تلقائية إذا رُسمت الخارطة على سطح كروي ، وهو تمثيل صادق لهندسة الأرض ؛ وعندما نفعل ذلك يفقد خط الاستواء ميزته على الخارطة ، وما رُسم على الخارطة المنبسطة بخطوط مستقيمة (كخطوط الطول مثلاً) يصبح دوائر عظمى على الخارطة الكروية (الدائرة العظمى هي كل دائرة تقسم سطح الكرة الى نصفين بالتمام) .

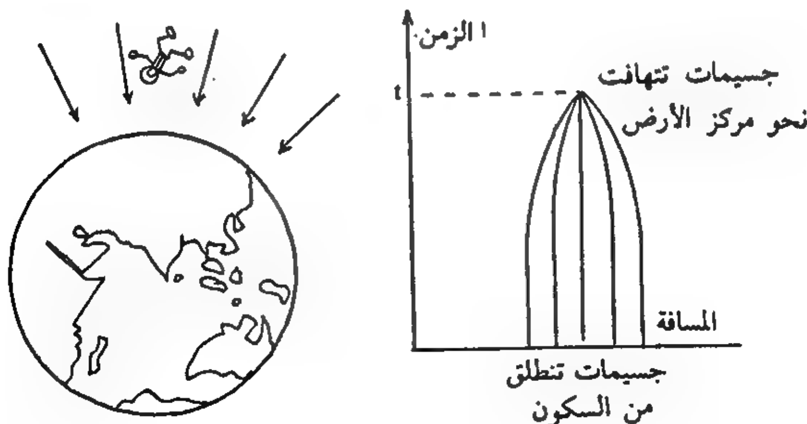
إن هذه الاعتبارات توحي بأن التشوه الذي يشوب خرائط المكان ـ الزمان ناجم على الأرجح عن أن المكان ـ الزمان ليس في حقيقته منبسطاً ، بل هو منحن .

قد تبدو فكرة المكان ـ الزمان المنحني مريعة لأول وهلة أو حتى غير مفهومة . إن بعض خواص هذا الانحناء تتضح لدى التأمل في أثره على المكان والزمان ، كلاً على حدة . فقد درس الرياضيون انحناء الفضاء سنوات عديدة . إن سمات مثل هذه الفضاءات تبرز من المقارنة مع الفضاء المنبسط . فنحن ، عندما نتكلم عن الفضاء المنبسط ، نقصد به فضاء (مهما كان عدد أبعاده) يخضع لقواعد الهندسة التي يتعلمها تلميذ المدرسة . إن مجموعة هذه القواعد معروفة باسم الهندسة الاقليدية ، نسبة الى عالم الهندسة الأغريقي ، إقليدس ، كما ذكرنا . فعندما كنا نتعامل في المدرسة مع الفضاء ذي البعدين كنا نمثله بصفيحة الورق المنبسطة . فاذا ظلت الورقة منبسطة أمكن التحقق بسهولة من صحة الخواص المألوفة للأشكال الهندسية . فمن الخواص الأولية لهذه الأشكال نعلم أن مجموع زوايا المثلث يساوي ١٨٠ درجة . إن هذه القواعد ، المستخرجة من الأشكال المرسومة على سطوح منبسطة ، ستصح أيضاً في الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة إذا كان بالمستطاع دوماً صنع شرائح فيه منبسطة بحد ذاتها . إن إمكانية صنع مثل هذه الشرائح المنبسطة لم تكن قط موضع شك لدى هنادسة الاغريق ، ومازال أمراً مسلماً به لدى الكثير من أناس هذا العصر . وفي الواقع ، عندما نقيس الزوايا والمسافات في فضائنا هذا (ليس ضرورياً أن

نرسم الأشكال بالفعل) بواسطة الآلات الشائعة نجد ، في حدود دقتها ، أن هندسة اقليدس المستوية تسود في جوار سطح كرة الأرض (انظر الشكل ٤ ـ ٨) .

لنفكر الآن في إمكانية فضاء منحن . وكمثال على فضاء من هذا القبيل (فضاء رياضي) نسوق سطح رقاقة منحنية محتواة في فضاء مسطح ذي ثلاثة أبعاد . وقد أوردنا في الفصل الأول سطح الكرة كصورة مفيدة لمثل هذه العملية . إن قواعد هندسة إقليدس لا تصح على سطح الكرة ، وهذا يتضح بسرعة من فحص الشكل ٤ ـ ٩ . ولفهم هذا الشكل لاحظ أولاً استحالة رسم خطوط مستقيمة على هذا السطح المنحني . على أننا

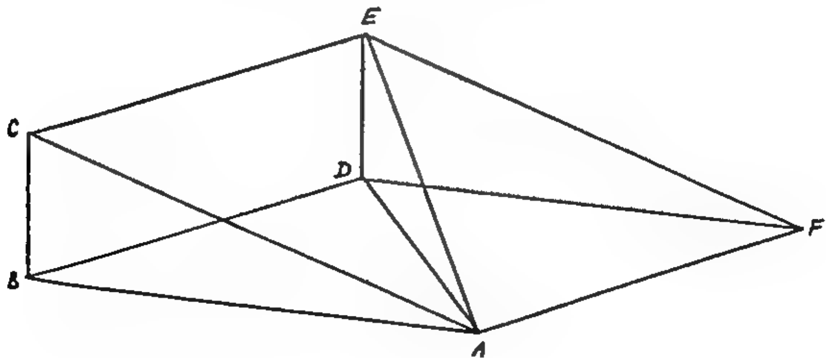
شكل ٤ ـ ٧ . لماذا الفضاء منحن ؟ لنتصور مطراً من الجسيمات ينطلق من السكون ويسقط نحو الأرض . إنها كلها تتجه نحو مركز الأرض (عبر ثقوب تتيح لها بلوغه) . إن مساراتها (خطوطها العالمية) على خارطة المكان ـ الزمان تتقارب لتبلغ هذا المركز في زمن لاحق t . فرغم أن هذه المسارات تُرى ، عند الراصد الساقط حراً وفي السلّم الموضعي الصغير ، كأنها مستقيمات متوازية ، إلا أنها في حقيقتها منحنية تدريجياً نحو نقطة . إن هذا يذكرنا بخطوط الطول على خارطة عادية ، فهي تنحني لتتلاقي في نقطة (عند القطبين) . ولئن كانت تبدو متوازية ومستقيمة ودون أن نلحظ فيها أي انحناء موضعي في سلّم خارطة المدينة ، إلا أن انحناءها يرى واضحاً على خارطة العالم (إسقاط مركاتور) عند القطبين . وسبب ذلك هو أن الأرض كروية والخارطة منبسطة . إن هذه الاعتبارات توحي بأن المكان ـ الزمان منحن في حقل التثاقل ، وليس «منبسطاً» .



نستطيع أن نرسم عليه ، وبين نقطتين منه ، خطاً مستقيماً بمعنى أن يكون أقصر مسافة بين النقطتين . وهذا الخط الأصغري ، على السطح المنحني ، يعرف باسم الخط الجيوديزي . إن الخطوط الجيوديزية على سطح الكرة هي أجزاء الدوائر العظمى عليه ، وهذه الدوائر هي مقاطع سطح الكرة بمستويات تحوي مركز الكرة . إن الطائرات تطير عادة قرب الخط الجيوديزي بين مدينتين لجعل مسافة الرحلة أصغر مايمكن . فالخط الجيوديزي بين نيويورك وطوكيو يمر قرب القطب الشمالي ، مما يدعو ربان الطائرة الى التوجه شمالاً أولاً ثم جنوباً كي يسلك مساراً «مستقيماً» .

إن خصائص الخطوط الجيوديزية تتوقف على طبيعة السطح الذي نرسمها عليه . فعلى السطح المنبسط نستطيع دوماً أن نرسم جيوديزيات متوازية . لكن هذا ليس ممكناً على

شكل ٤ ـ ٨ . هل يمكن أن يبدو الفضاء ذو الأبعاد الثلاثة مستوياً ؟ إذا اكتفينا بدقة الآلات «اليومية» فإن قواعد الهندسة المستخرجة من الرسم على ورقة مستوية يمكن أن تنطبق ، يقيناً ودون خطأ يذكر ، على الأشكال ذات الأبعاد الثلاثة (قرب الأرض على الأقل) . فطول الخط المائل (AE) ،مثلاً ، على السطح (ACEF) يمكن أن يُحسب بدلالة الانحدار (الزاوية CAB) والانفراج (الزاوية CAE) وذلك بتقسيم الشكل الى مثلثات ومستطيلات مستوية ، كما في الرسم . وبسبب انطباق قواعد الهندسة المستوية على المجسمات الفضائية نقول إن الفضاء منبسط . لكن الأجهزة العظيمة الدقة تكشف أنه منحن قليلاً في الواقع .

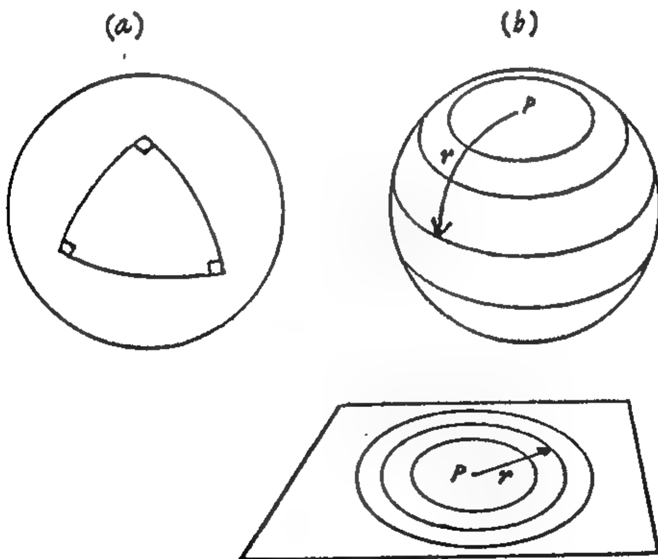


سطح كروي ، لأن أي دائرتين عظميين لابد أن تتقاطعا مرتين (فدوائر منتصف النهار ـ خطوط الطول ـ على سطح كرة الأرض تتقاطع كلها عند القطبين رغم أنها تبدو متوازية عند خط الاستواء) .

لقد رسمنا في الشكل ٤ ـ ٩ (a) مثلثاً كروياً أضلاعه خطوط جيوديزية . نرى بسهولة أن مجموع زواياه يساوي ثلاث زوايا قائمة (٢٧٠ درجة) ، بدلاً من قائمتين كما هي الحال في مثلثات الهندسة المستوية .

وكمثال آخر موضح في الشكل ٤ ـ ٩ (b) نرى دوائر متمركزة مرسومة حول نقطة P من سطح كروي ، وكذلك في سطح منبسط . ومعلوم أن نسبة محيط أية دائرة ، في سطح منبسط ، على نصف قطرها نسبة ثابتة (2π ، لاتتغير بين دائرة وأخرى) . لكن من الواضح

شكل ٤ ـ ٩ . فضاء منحن . إن سطح الكرة فضاء (رياضي) منحن . واضح أن مجموع زوايا المثلث في هذا الفضاء لا يساوي ١٨٠ درجة . كما أن محيط الدائرة لا يتزايد دوماً بتزايد نصف قطرها . أما في منطقة صغيرة فالفضاء منبسط تقريباً وتسود فيه هندسة اقليدس .



أن محيط الدائرة المرسومة على الكرة بنصف قطر معين ، r ، أصغر من $2\pi r$ ويتناقص بازدياد r وبعد أن يتجاوز r ربع محيط الدائرة العظمى على السطح . وهذا يعني وجود محيط أعظمي من أجل هذه الدوائر . لكننا نلاحظ ، مع ذلك وفي المثالين الواردين هنا ، أن الهندسة الاقليدية تظل علماً تقريبياً جيداً في مناطق صغيرة من سطح الكرة . ففي السلّم الصغير (أي موضعياً) يكون السطح منبسطاً تقريباً .

ورغم أن سمات هندسة السطوح المنحنية قد توضحت هنا من خلال تضمين السطح في فضاء منبسط ذي ثلاثة أبعاد ، فإننا لو تصورنا كائناً عاقلاً ذا بعدين ملازما لسطح الكرة ، تماماً ودوماً ودون أن يرى شيئاً من عالمنا الثلاثي ، فإن باستطاعة هذا الكائن أن يستنتج ، مع ذلك وبفضل أرصاد جارية كلها ضمن السطح ، أن مجموع زوايا المثلثات الكبيرة مثلاً لا يساوي قائمتين . ويستطيع أن يستنتج أيضاً استحالة رسم خطوط جيوديزية متوازية في فضائه ، وأشياء عديدة أخرى من خواص الكرة . نعبر عن هذا الواقع بأسلوب آخر فنقول : ليست هذه الخصائص مجرد مظاهر للطريقة التي اخترناها في تضمين السطح في الفضاء الأشمل ، إنما هي أصيلة في السطح نفسه . وبالاضافة الى هذه البنية الهندسية الأصيلة فإن الكائن الطموح ذا البعدين ، قاطن هذا السطح ، يستطيع أيضاً أن يكتشف ، بالسفر البعيد وبالرصد ، الخصائص التوبولوجيةللكرة ، كونها سطحاً مغلقاً ومحدوداً ، مثلاً .

إن النتائج التي حصلنا عليها من اعتبارات تتناول فضاء ذا بعدين (أي سطحاً) يمكن أن تنطبق على أي فضاء ذي عدد أبعاد أكبر . وهناك طبعاً إمكانية أن يكون فضاؤنا الفيزيائي الواقعي ذو الأبعاد الثلاثة (أو حتى المكان ـ الزمان ذو الأربعة أبعاد) محكوماً بقواعد الهندسة الكروية أو سواها ، لا بالهندسة الاقليدية . وقد يكون مجمل الفضاء ذا هندسة أصيلة غير اقليدية .

إن الفضاء المنحني الثلاثي يتمتع بصفات خاصة . لنفترض مثلاً أن الفضاء الثلاثي يشبه الكرة في الفضاء الثنائي . لايوجد عندئذ نسبة ثابتة بين نصف قطر الدائرة ومحيطها ، بل يوجد دوائر ذات محيط أعظمي . إن الكرات في الفضاء الثلاثي تقوم مقام الدوائر في الثنائي ، فتصبح مساحات سطوحها بمنزلة المحيطات . ومعلوم أن قواعد الهندسة

الاقليدية تقول بوجود نسبة ثابتة (٤ π) بين مربع نصف القطر r ومساحة سطح الكرة. فالفضـاء الكروي الثلاثي، على شاكلة مارأينا في الفضاء الثنائي، يتصف بأن مساحة سطح الكرة أصغر عموماً من $4\pi r^2$. وفوق ذلك، ومن أجل كرات متزايدة السطوح يوجد سطح ذو مساحة أعظمية يبدأ السطح بعده بالتناقص لدى ازدياد نصف القطر! إن الحجم الكلي لمثل هذا الفضاء محدود. وهذه الصفة المميزة يمكن امتحانها (مبدئيا) بالرصد في عالمنا الواقعي. وسنعود في الفصل الخامس الى هذا الموضوع لمناقشة الشواهد التي تشير الى أن هندسة هذا العالم قد تكون كروية في المجالات الواسعة.

لقد اضطلع اينشتاين، في اقتراحه الثوري الجريء، بربط هذه الأفكار الرياضية عن الهندسة المنحنية بخواص التثاقل الفيزيائية. وقد قال بأن المكان ـ الزمان ليس منبسطاً في الحقل الثقالي، فهو لايذعن لأحكام الهندسة الاقليدية، بل هو فضاء منحن ذو بنية هنـدسية أشـد تعقيداً. فالجسيم الساقط حراً يتحرك عبر هذه البنية المنحنية على مسار أصغري ـ خط جيوديزي. ولو كانت الثقالة غير موجودة لكان المكان ـ الزمان منبسطاً، وعندها يكون الجسيم في الحالة النيوتنية المعروفة، حراً من القوى، وينقلب مساره الى حركة منتظمة في خط مستقيم. وطبقاً لهذه الأفكار الجديدة فإن المرجع الذي يسقط حراً في موضع يسود فيه حقل تثاقلي لا متجانس (أي غير نسيق) سيعاني تشوهاً مكانياً ـ زمانياً، إذ أن الهنـدسة المنحنية تقضي بانحناء المكان ـ الزمان. وهذا ما يجعل الجسيمات، التي تسقط حرة وهي مفصولة بمسافات كبيرة، تتبع مسارات منحنية، كما شرحنا في الفقرة السابقة لدى الكلام عن تجربة الراصد القاطن في صندوق يسقط حراً.

لقـد ذكـرنـا في الفصل الأول أن نيوتن اكتشف ميكانيكه من التساؤل عن سبب التسارع لا عن سبب الحركة المنتظمة. إذ كان يعتبر أن الحركة العطالية (المنتظمة) طبيعية ولا تحتـاج الى تفسير. فالقوى ضرروية لتغيير السرعة المنتظمة لا لاستمرارها. وكانت الثقـالـة واحـدة من هذه القـوى، وهي التي تدعـو الجسم الى التسـارع نحو الأرض. وبعدها، وفي مستهل هذا القرن، تقدم اينشتاين خطوة أخرى. فاعتبر سقوط الأجسام حالة حركية طبيعية هي الأخرى، ولكن في مكان ـ زمان منحن. فليس في الثقالة إذن أي لغـز. وليس سقـوط التفـاحـة هو الـذي يحتاج الى تفسير، بل توقفها عندما تصل الى

الأرض . فكما ألغى نيوتن القوى من الحركة المنتظمة ألغى اينشتاين القوى من حركة السقوط ، وجعلها مسئولة عن كل شذوذ يطرأ على هذه الحركة . فعندما تصطدم التفاحة بالأرض تتدخل قوى غير ثقالية تخرج مسارها المكاني ـ الزماني عن الخط الجيوديزي الطبيعي . أما الأرض فهي ، بخلاف ذلك ، تتثاقل نحو الشمس في مسار منحن ، ليس لأنها محكومة بقوة تحرفها عن الخط المستقيم بل لأنها تجري في مستقر لها عبر المكان ـ الزمان المنحني في جوار الشمس (ذلك تقدير العزيز العليم ـ القرآن الكريم . «المترجم») . إن هذا التطابق الرائع بين الثقالة والهندسة قد استُقبل كواحد من أعظم الفتوح التي أحرزها الفكر البشري في تاريخه كله .

إن الوصف الكيفي للتثاقل بلغة الهندسة ، كما فصلناه هنا ، لا يشكل طبعاً بحد ذاته نظرية فيزيائية . وكان على اينشتاين أن يقدم مجموعة من المعادلات الرياضية تشرح كيف يحني منبع الثقالة المناط المكاني ـ الزماني في جواره . وقد كان في بحثه عن المعادلات الصحيحة يهتدي بعدة مبادىء أساسية . منها مثلاً أن تقترب نظريته من نظرية نيوتن في التثاقل كحالة حدية عندما تنتهي حقول التثاقل والسرعات الى قيم ضعيفة . وهذا مطلب جوهري لأن نموذج نيوتن الثقالي كان (ومايزال) يستخدم بنجاح باهر أجيالاً عديدة . وعلى نظرية النسبية العامة ، ثانياً وفي حالة حقول ثقالية ضعيفة وسرعات عالية ، أن تؤول الى نظرية النسبية الخاصة .

لقد كانت الكتلة في نظرية نيوتن تعمل كمنبع لثقالتها . لكن هذا المقدار ليس منبعاً ملائماً في نظرية النسبية ، لأن الكتلة تكافىء الطاقة (وفق $E= mc^2$) التي هي بدورها مرتبطة بالاندفاع بالأسلوب نفسه الذي يربط المكان بالزمان في نظرية النسبية . والاندفاع ذو علاقة صميمية بالتوتر الميكانيكي والضغط . وعلى هذا فكل نظرية ثقالية منسجمة مع النسبية يجب أن تبيح لكل هذه المقادير الميكانيكية ـ التوتر والطاقة والاندفاع ـ أن تولّد ثقالة .

وكخطوة ثانية يجب ايجاد المقدار الهندسي المكاني ـ الزماني اللازم ربطه بهذا المنبع . ومن فحص كيفية ترابط الطاقة والاندفاع استطاع اينشتاين ايجاد مقدارين هندسيين يصفان انحناء المكان ـ الزمان ويترابطان معاً بالكيفية نفسها . ومن موازنة كل مقدارين معاً ـ واحد هندسي وواحد فيزيائي ـ توصل الى معادلات الحقل الشهيرة التي تحمل اسمه . وهذه

المعادلات تبين بالتفصيل كيف يمكن لتوزع معين ، من المقادير : توتر ـ طاقة ـ اندفاع ، أن يشوه نسيج المكان ـ الزمان في جواره .

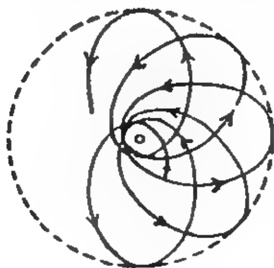
إن أهم سمات معادلات آينشتاين الحقلية هي صعوبة حلها الكأداء . والواقع أنها ، بعد مرور ستين عاماً على اكتشافها ، لم يُعرف لها سوى حفنة من الحلول الدقيقة . وقد أصابت ، لحسن الحظ وبعد اكتشافها بعام واحد ، أبسط هذه الحلول وأهمها حتى اليوم ، وهو الحل الذي يتعلق بحالة المكان ـ الزمان الخالي في جوار جسم كروي . وقد أوجده شفارتزشلد K.Schwarzschild (فلكي ألماني ، ١٨٧٣ ـ ١٩١٦) وعُرف باسمه . إن هذه الجملة ـ كتلة كروية محوطة بفضاء خال ـ تؤلف ، رغم بساطتها ، نموذجاً جيداً للمنظومة الشمسية : الشمس كرة في المركز والفضاء الخالي المنطقة التي تتحرك فيها الكواكب (وتهمل ثقالة الكواكب نفسها أمام ثقالة الشمس) . فبحساب المسارات الجيوديزية في مكان ـ زمان شفارتزشلد يستطيع المرء أن يعرف شكل المدارات الكوكبية . وهذه مسألة قديمة تناولها كبلر (ألماني ، ١٥٧١ ـ ١٦٣٠) ثم نيوتن في نظريته ، وخلصا من حساباتهما القديمة الى أن المدارات الكوكبية إهليلجات تحتل الشمس فيها أحد المحرقين ، وهذه نتيجة عظيمة ثبت اتفاقها مع نتائج الأرصاد .

ونظرية النسبية العامة تعطي في هذا الصدد نتيجة جد قريبة مما تعطيه نظرية نيوتن ، لكن بينهما فرقاً هو ، على ضآلته ، حاسم في الحكم بينهما : فبدلاً من الاهليلج المحكم الثابت تتنبأ نظرية النسبية بدوران محوريه في مستويها (هذه الحركة معروفة باسم المبادرة) بسرعة صغيرة جداً (شكل ٤ ـ ١٠) وسرعة هذه المبادرة من أجل عطارد ، وهو أخف الكواكب وأقربها الى الشمس ، هي من رتبة ٤٣ ثانية قوسية فقط في القرن الواحد ، أي أن الدورة الكاملة لهذه المبادرة تستغرق ثلاثة ملايين سنة . والحق أن ثمة أسباباً عديدة يمكن أن تولّد مبادرة في فلك عطارد وهي فوق ذلك أعظم أثراً ، إلا أنها يمكن أن تحسب وقد حصل . لكن المعروف بالفعل ، وقبل أن ينشر آينشتاين نتائج أعماله ، أنه يبقى رغم ذلك فرق من رتبة ٤٠ ثانية قوسية في القرن الواحد من أجل مبادرة فلك عطارد . إن المفهوم الرائع الذي ابتدعه آينشتاين لتفسير هذا الفرق بلغة انحناء المكان ـ الزمان يُعد واحداً من الشواهد الرصدية القليلة على صحة نظرية النسبية العامة .

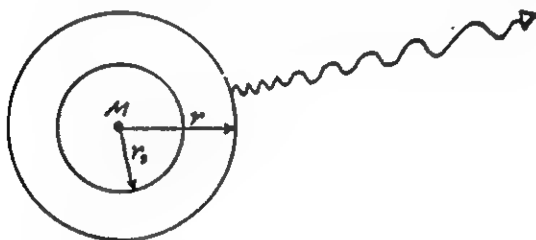
كفانا الآن حديثاً عن انحناء المكان ـ الزمان وعن مفعوله في مسارات جسيمات الاختبار فيه . ولنركز الآن اهتمامنا على مفعوله في الزمان وعلى كيفية تأثير تشوه المكان ـ الزمان في معدل سير الميقاتيات الموضوعة في حقل ثقالي .

إن إحدى السمات التي تتسم بها عدة نظريات ثقالية ، بما فيها نظرية النسبية العامة ، هي أن الميقاتية الموضوعة في حقل ثقالي شديد ، قرب سطح كرة مادية عظيمة مثلاً ، تسير (عقاربها) بأبطأ من سير ميقاتية مماثلة بعيدة جداً عن أية كتلة . إن هذا التمدد الزمني الثقالي موجود ، أيضاً وتلقائياً ، في أحشاء حل شفارتزشلد الذي تخرج تفاصيلة عن نطاق هذا الكتاب . على أن القارىء الملم بشيء من نظرية الكم يمكن أن ينتفع بالشرح المصاحب للشكل ٤ ـ ١١ . ومرة أخرى ، هذا المفعول صغير جداً في المنظومة الشمسية ، وتمدد الزمن النسبي عند سطح الأرض هو من رتبة $١٠^{-١٨}$ فقط في السنتيمتر باتجاه الشاقول . ومع ذلك يمكن قياس هذا المفعول باستخدام ميقاتية ذرية . وإن ما نناقشه هنا هو بالطبع معدل ميقاتي نسبي . ويجب أن لا يظن القارىء أن الزمن يبدو قرب سطح الأرض منساباً بأبطأ منه في الفضاء الخارجي ، بل إنه يعني فقط أن الميقاتيتين الموضوعتين في هذين الموقعين المختلفين يختل تزاملهما تدريجياً .

شكل ٤ ـ ١٠ . انحناء المكان ـ الزمان يفتل فلك عطارد . اكتشف كبلر أن هذا المدار اهليلجي . وفسر نيوتن ذلك باستخدام نظريته في التثاقل . أما نظرية اينشتاين ، وهي تتنبأ أيضاً بمدار إهليلجي ، فتقول بأن هذا الاهليلج يدور ببطء في مستويه . وسرعة هذه المبادرة ، من أجل عطارد ، لا تتجاوز ٤٣ ثانية قوسية في القرن الواحد .



شكل ٤ ـ ١١ . نصف قطر شفارتزشلد . إن لفوتون الضوء تواتراً ميكانيكياً كمومياً متناسباً مع طاقته . وهذه الطاقة تعادل ، بموجب النسبية الخاصة ، كتلة تعادل mc^2 . إن الكتلة M (نفترض تبسيطاً أنها نقطية) تسلط على m قوة جذب ثقالية تساوي GMm/r^2 عند نيوتن . وبذلك يفقد الفوتون ، عندما يبتعد من المسافة r الى اللا نهاية ، طاقة تساوي GMm/r . وهذه تمثل فقداناً نسبياً ، وبالتالي تناقصاً في التواتر نسبته GM/rc^2 . فاذا اتخذنا تواتر الفوتون إيقاعاً ميقاتياً ، فإن هذا التناقص النسبي يمثل تباطؤاً نسبياً للميقاتية الموضوعة على المسافة r ، كما يراه راصد ناء . فتمدد الزمن يصبح كبيراً جداً ، وبالتالي شدة الضوء الهارب خافتة ، عندما يصبح r من رتبة GM/c^2 ، لأن نسبة فقدان الطاقة تقترب من الواحد . ونظرية النسبية تتطلب بالفعل أن يحدث ذلك عندما يكون $r = 2GM/c^2$. إن هذه المسافة معروفة باسم نصف قطر شفارتزشلد ويرمز لها بـ r_0 في الشكل . وأغلبية الأشياء في هذا العالم أكبر بكثير من نصف قطر شفارتزشلد المتعلق بها ، وعلى هذا فإن تمدد الزمن من أجلها يكاد لا يذكر .



٤ ـ ٣ الثقوب السوداء : انهيار المكان ـ الزمان وتلاشيه

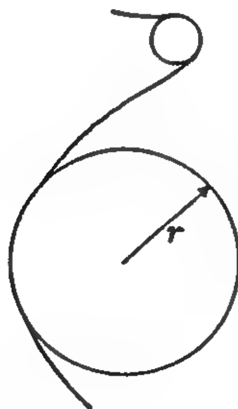
لو كان مفعول الثقالة في المكان ـ الزمان مقتصراً على التأثيرات الواهية المشروحة أعلاه ، لظلّت نظرية النسبية عندئذ فرعاً معزولاً من فروع الفيزياء ، نوعاً من الترف الفكري . على أن السنوات الأخيرة قد أظهرت إمكانية أن يوجد في هذا العالم أجرام عجيبة ذات ثقالة شديدة لدرجة أنها تغير جذرياً خواص المكان والزمان في جوارها ، وبصورة غريبة ساحرة .

إن فحص استعمال كلمة «شديد» هنا أمر يستحق العناء . أين نستطيع اعتبار الحقل الثقالي شديداً ؟ عندما يصبح انحناء المكان ـ الزمان فيه عظيماً . ولأخذ فكرة عن الظروف التي يحدث فيها ذلك لابد من معرفة كيفية قياس هذا الانحناء . لقد رسمنا خطاً منحنياً

في الشكل ٤ ـ ١٢ حيث رسمنا ، لتقدير الانحناء في نقطتين ، دائريتن ماستين للمنحني . نستخدم نصفي قطري هاتين الدائرتين دليلاً في تقدير انحناء الخط : فحيث يكون نصف القطر صغيراً يكون الانحناء كبيراً . ويمكن اعتماد طريقة مشابهة لهذه في تقدير انحناء المكان ـ الزمان . وبذلك نستطيع تعريف قياس للانحناء في كل نقطة . ومن مقارنة هذا القياس بوحدات المسافات العادية يمكن أن نقدر الشدة الثقالية .

لنفترض مؤقتاً أن كل الكتلة المتاقلة في حل شفارتزشلد المتناظر كروياً قد تركزت في نقطة واحدة . فعلى مسافة نائية من هذه الكتلة يكون انحناء المكان ـ الزمان ضعيفاً ، لكن هذا الانحناء يشتد باشتداد حقل التثاقل لدى الاقتراب من المركز . وعلى مسافة معينة من الكتلة المركزة يصبح الانحناء مساوياً هذه المسافة بالذات ويصبح تشوه المكان ـ الزمان عظيماً جداً عندها . إن هذه المسافة الحرجة تتوقف على كتلة الجرم ، M ، وعلى ثابت الثقالة ، G ، ويمكن أن نضيف سرعة الضوء ، c ، لأن هذه السرعة تصل مابين وحدتي قياس المسافة والزمن كما شرحنا في الفصل الثاني . وخير وسيلة لضم G و M و c معاً ، كي نحصل على مقدار من جنس المسافة ، هو أن نعتمد GM / c^2 ؛ عندئذ ، وبصرف النظر

شكل ٤ ـ ١٢ . انحناء الخط يقاس بنصف الدائرة الماسة له . وحيث يكون نصف قطر هذه الدائرة صغيراً يكون الانحناء كبيراً .



عن مضروف عددي ، يصبح هذا المقدار نصف قطر الكرة المحيطة بالكتلة والتي يكون عندها التشوه الثقالي للمكان ـ الزمان عظيماً جداً . ونحصل على هذه النتيجة نفسها من اعتبارات كمومية تتصل بالشكل ٤ ـ ١١ . ونصف القطر هذا ، GM / c^2 ، كان لابلاس G.Laplace (فرنسي ، ١٧٤٩ ـ ١٨٢٧) قد اكتشفه منذ عام ١٧٩٦ على أنه (نصف) المسافة التي يتطلب الخروج من داخلها ، للتخلص من ثقالة الكتلة المركزية ، سرعة إفلات تفوق سرعة الضوء .

على أن حل شفارتزشلد يعطي لنصف القطر الحرج القيمة $2GM/c^2$ التي تُعرف اليوم باسم نصف قطر شفارتزشلد r_s . وقيمته من أجل الأرض حوالي سنتمتر واحد ، ومن أجل الشمس حوالي كيلو متر واحد . لكن هذين الجرمين أكبر بكثير جداً من قيمتي r_s المتعلقتين بهما ، وهذا يتفق مع مانعلمه بالتجربة من أن تشوه المكان ـ الزمان في جوارهما ضئيل جداً .

يجب إذن أن لا نتصور أن هذا التشوه يصبح عظيماً قرب مركزي هذين الجرمين ، لأن حل شفارتزشلد لا ينطبق إلا على المنطقة الخارجية ، أي الفضاء الخالي خارج الكتلة المركزية . فمفعول الانحناء لا يصبح عظيماً إلا إذا تقلصت كتلة الجرم كلها الى مادون r_s . فاذا اعتمدنا الشمس كمثال نوعي ، وتقلصت ليصبح قطرها من رتبة كيلو متر واحد ، فإن كثافتها تصبح هائلة ، أكبر من كثافة الماء بحوالي 10^{17} مرة ! لكن كثافة الأرض تصبح أكثر من هذه بحوالي مليون مرة لو تقلصت الى حجم البيضة ! أما في الطرف الآخر فيكفي أن تكون كثافة مادة المجرة قريبة من كثافة الماء ، بينما الكثافة الحرجة للعالم كله تساوي حوالي مئة مرة من الكثافة المحسوبة عملياً من رصد الأجرام المضيئة .

إن الجرم الذي يتقلص ليصبح نصف قطره حوالي r_s يتمتع ، من جملة خواصه ، بأن الشعاع الضوئي يفقد عندما يخترق سطحه كل طاقته للافلات من الجاذبية المريعة . وعلى هذا فإن سطح هذا الجرم يظهر مظلماً جداً للراصد البعيد . إن هذا ما تكهن به لابلاس عام ١٧٩٦ ، معتمداً على نظرية نيوتن في التثاقل ، حين قال بامكانية وجود أجرام في هذا الكون ذات كتل عظيمة ولون أسود تماماً لعدم وجود نور ذي طاقة تجعله قادراً على الإفلات من جاذبية الجرم الهائلة . إن تمدد الزمن على سطح هذا الجرم المرصوص جداً ، والمرصود بنوره المائت ، يصبح شبه لا نهائي ، مما يجعل الحوادث هناك تجري ببطء شديد لدرجة أن

سطح الجرم يبدو في حالة «تجمد» شبه أبدي . ولهذا السبب كان يطلق على مثل هذه الأجرام الافتراضية عبارة «النجوم المتجمدة» وهي تسمية رديئة خادعة لأن سطوحها ، إن وجدت ، لابد أن تبدو سوداء حالكة السواد ، وعلى هذا نرى من الأنسب اعتماد العبارة الجديدة المعروفة : الثقوب السوداء .

لقد قدم بعض الفلكيين النظريين عدداً من المخططات يمكن أن يتشكل وفقها ثقب أسود في واقع هذا العالم . منها مثلاً ماهو مقبول عموماً من أن العالم كان قبل عشرة مليارات سنة في ظروف كثافة عالية جداً ارتصت أثناءها كل المادة المبعثرة اليوم في أرجائه . وربما كان قد حدث في تلك الظروف أن وقعت التكاثفات المادية الموضعية في حبائل ثقالتها الخاصة فارتصت الى حجم ثقب أسود مجهري لا يختلف عن الجسيم الأولي إلا بعظم كتلته التي تبلغ ١٠^١٠ غرام . وعلى نقيض ذلك يرى آخرون أنه قد تيسر لبعض الأجرام ، التي تعادل كتلتها كتلة ملايين النجوم ، أن تتهافت مادتها حتى تبلغ الحجم الحرج الذي يجعلها ثقباً أسود ، ودون أن يتطلب ذلك كثافة فائقة الكبر .

ربما كان أكثر المخططات معقولية هو أن يتشكل الثقب الأسود من كتل نجمية عادية . ففي السنوات الأخيرة أصبح من المعتقد أن الثقب الأسود هو المصير المحتوم لبعض النجوم العظيمة . ولفهم سبب هذا المصير لابد من أن نأخذ فكرة عن بنية النجوم .

إن غالبية النجوم تشبه شمسنا وتتألف في معظمها من الهدروجين ، أخف العناصر ، ويبلغ قطرها مليوناً ونصف المليون من الكيلو مترات . وليست هي مع ذلك بذات كثافة عالية ، وذلك للأسباب التالية . إن ثقالة المادة النجمية تجر الهدروجين نحو المركز ، وبارتصاصه يسخن هذا الغاز حتى يبلغ قرب المركز ظروف الاندماج النووي (عدة ملايين درجة) ـ هي ظروف القنبلة الهدروجينية . والاندماج النووي يتم من خلال التنافس بين القوى النووية التجاذبية القصيرة المدى (المسئولة عن التفاعل الشديد بين البروتونات والنترونات في نواة الذرة) والقوى الكهربائية البعيدة المدى والتنافرية بين البروتونات المتكهربة . ففي مراكز النجوم تبلغ الحرارة درجة تجعل نوى الذرات سريعة جداً وتصادمها عنيفاً لدرجة أن يقهر التنافر الكهربائي فيقرب المسافات بين البروتونات حتى تفعل القوى النووية التجاذبية الشديدة فعلها . وبذلك تندمج النوى الخفيفة (كالهدروجين مثلاً) معاً

لتشكل نوى أثقل (كالهليوم مثلاً) . وأثناء هذا الاندماج يتحول قسم من المادة الى طاقة تحملها أشعة غاما ونترينوات .

ولهذه الطاقة مفعولان . فهي أولاً تحتفظ للنجم بحرارته ويستمر الاندماج . والواقع أن النجوم التي مثل شمسنا جمل متوازنة ، أي في حالة استقرار متواصل ناتج عن التساوي بين الحرارة التي تضيع منها في الفضاء حولها وبين الطاقة التي يعوضها لها الاندماج النووي . وهي ثانياً تولد ضغطاً إشعاعياً يمنع الطبقات البعيدة عن المركز من أن تتهافت نحوه ، مما يجعل المادة النجمية ذات كثافة ضعيفة (أقل من كثافة الماء ، قرب سطح الشمس) . وعملية الاندماج التي تزود النجم بمعظم طاقته تحول الهدروجين الى هليوم ، وهو العنصر الذي يلي الهدروجين في خفته . وبمرور الزمن تتناقص كمية الهدروجين حتى يبلغ من الندرة درجة يختل عندها التوازن الطاقي للنجم ويبدأ من حياته فترة هيجان عنيف . ومن المتوقع أن لا يحدث هذا في شمسنا قبل آلاف الملايين من السنين . لكنه حدث مؤخراً في النجوم الأثقل من شمسنا ببضع مرات (وهذا نادر) . ونحن لانهتم هنا بالمراحل التي تلي ذلك ، لكن موت النجم لابد أن يقع إما بانفجار مدمر أو بتهافت ثقالي . لكن المعروف منذ زمن طويل أن التهافت الثقالي هو مصير النجم الذي استهلك وقوده النووي . فقد اكتشفت فعلاً في الفضاء نجوم ذات كثافة عالية جداً ـ وتعرف بالأقزام البيضاء ـ وهي ، قرب سطحها ، أعظم ثقالة من الشمس بآلاف المرات . إن مادة القزم الأبيض مرصوصة لدرجة أن حجم الطن الواحد منها لا يتجاوز حجم الكشتبان .

إن الارتصاص الثقالي للقزم الأبيض يقف عند حد تفرضه عليه مفعولات كمومية رهيفة تعرف باسم ضغط تردي الالكترون . فهذا المفعول الجديد لا يحتمل كتلة أعظم بـ ١٫٤٤ مرة من كتلة الشمس . أما الأجرام الأكثف من الأقزام البيضاء فتدين بوجودها الى بلوغ قوة التثاقل شدة عظيمة لدرجة أنها تسحق الذرات الافرادية وتحيلها الى نترونات . إن هذه النجوم النترونية ذات كثافة لاتُصدق ، فقطرها لا يتجاوز بضعة كيلو مترات ، بينما كتلتها من رتبة كتلة الشمس . وكتلة ملعقة شاي واحدة من مادة النجم النتروني عند سطحه تزن قرابة مئة مليون طن ! ولو قُدِّر لاحدى عابرات المحيطات أن تتحول لنجم نتروني لا نمسخت الى حجم حبة الرز !

وتدين النجوم النترونية بتماسكها لضغط تردي النترون ، وهذا لا يحتمل ، هو الآخر ، إلا نجوماً خفيفة لدرجة معقولة . أما من أجل نجوم ثقيلة حقاً فيبدو أنه لايوجد شيء آخر قادر على أن يحتمل ضغط ارتصاص كلي .

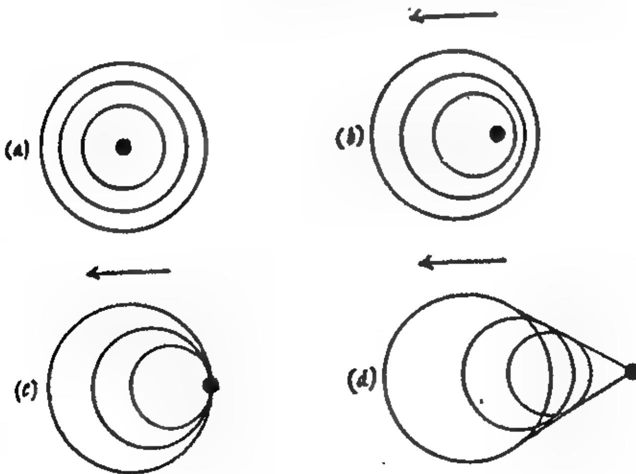
هذا ورغم أن التفاصيل الدقيقة للارتصاص تتعلق ، الى حد ما ، بالخواص المفترضة للمادة النترونية المكثفة ، إلا أن سماتها العامة معروفة تماماً . فنحن ، إزاء أجرام ذات ارتصاص ثقالي يفوق ارتصاص النجم النتروني ، نقف على أرضية حقل تثاقل شديد لابد أن نلجأ معه الى نظرية النسبية العامة كي نعالج هذه الأجرام . لكننا لا نملك ، مما نقدر على تحليله رياضياً ، غير نماذج مبسطة من حلول معادلات هذه النظرية الرائعة والمعقدة فنياً بآن واحد . فهناك مثلاً ، مما نستطيع دراسته بالتفصيل ، ارتصاص الأجرام الكروية تماماً ، التي تتعين الخواص الهندسية للفضاء المحيط بها بحل شفارتزشلد . وخير تقريب أولي هو أن نفترض أن كل أجزاء النجم تتهافت نحو مركزه بحرية ، أي باهمال الضغط الداخلي .

فمن وجهة نظر الراصد الساكن على سطح مثل هذا الجرم تبدو الحوادث جارية بسرعة مخيفة ، فأجزاء النجم تهوي نحو المركز مسرعة لدرجة أن سطحه يتقلص الى مساحة صغيرة في مدى أقل من ثانية زمنية واحدة . وقد لا يستغرق الأمر بالراصد أكثر من رفة جفن يجد نفسه وقد أصبح ضمن كرة شفارتزشلد الحرجة . ويصبح في سقوطه الحر عديم الوزن ، ويمر عبر هذا السطح الحرج دون أن يلحظ أي مفعول غير عادي في المكان ـ الزمان بجواره . على أن تتابع الحوادث ، كما يشاهدها راصد ناء جداً (لايهوي نحو مركز النجم وهو يتقلص) ، يختلف عن ذلك فعلاً . فعندما يقترب نصف قطر الجرم من نصف قطر شفارتزشلد ، r_s ، فإن سطحه يقترب من منطقة التمدد اللا متناهي للزمن . ومراحل هذا التقلص تبدو عندئذ للراصد النائي متباطئة تدريجياً حتى يغدو سلم الزمن متمدداً لدرجة لا يرى بعدها الراصد أي تقلص لاحق ، وإنما يرى الجرم بكل بساطة معلقاً يفيض قليلاً عن r_s ، متسمراً جامداً في الزمان الى الأبد .

فإذا لم يطرأ على الجرم تغير لاحق فلا أمل للراصد النائي في أن يرى ارتصاص النجم الى داخل كرة شفارتزشلد ، مهما طال انتظاره . وهكذا ، فإن مايحدث للنجم بعد هذه

المرحلة يظل سراً مغلقاً على من هو خارج عالمه (لأنه يقع «بعد اللا نهاية» في الزمان) . فـ ٢يقوم إذن مقام أفق حدوث يفصل الأحداث التي يمكن أن ترى من العالم الخارجي عن تلك التي لايمكن أن ترى منه . ولايمكن لأي شيء يقع ضمن هذا الأفق أن يتجلى أو أن يؤثر فيما يقع خارجه ، بأي حال من الأحوال ولا بأي مثقال مهما صغر .

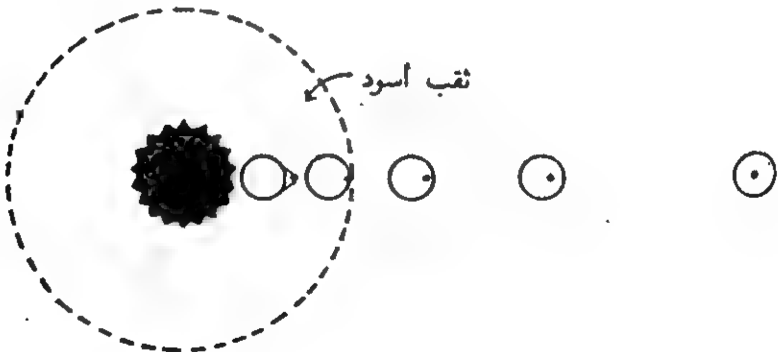
شكل ٤ - ١٣ . انجرار الضوء بالثقالة هو أحد تجليات المكان - الزمان المشوه . إن النقاط السوداء في المخططات تمثل منبعاً ضوئياً يصدر في كل الاتجاهات نبضة ضوئية . أما الدوائر فتمثل مواضع سطح الموجة المنتشرة ، في لحظات متتابعة لاحقة . في (a) لايوجد ثقالة ، فتنتشر الموجات بسرعة واحدة في كل الاتجاهات . في (b) يوجد حقل ثقالي متجه نحو اليسار يجر الأمواج في اتجاهه . أما (c) فهو امتداد لهذه الحالة عند سطح كرة شفارتزشلد الموضح في الشكل ٤ - ١٤ . ونقطة المنبع واقعة على مسافة ثابتة من مركز الجرم ، ونرى الدوائر منزاحة نحو اليمين كثيراً لدرجة أن الحرف الأيمن الذي يمثل ضوءاً يتجه خارج الجرم ، ولايمكن أن يسير الى أبعد من ذلك ، فلا يمكن للراصد النائي (على اليمين) أن يرى المنبع مهما طال انتظاره . أما (d) فيمثل الواضع داخل ٢ ، والمنبع على مسافة ثابتة من مركز الجرم . وهنا يكون انزياح دوائر الضوء عظيماً لدرجة أن سطوح الموجة ، المبتعدة والمقتربة من مركز الجرم ، تتجه كلها نحو الجرم جارفة معها أي جسم مادي موجود داخلها .



إن السمات الوصفية لثقب شفارتزشلد الأسود تتضح بسهولة بفحص سلوك الأمواج الضوئية في جواره . فتأثير الثقالة على الضوء يمكن أن يتمثل بنقاط ودوائر كالتي في الشكل ٤ ـ ١٣ . ففيه نفترض أن النقطة تمثل منبعاً يرسل نبضة ضوئية تنتشر في كل اتجاه ، وأن الدوائر هي مواضع سطح الموجة في لحظات متعاقبة لاحقة . ففي غياب الثقالة ، (a) ، يتوسع سطح الموجة بانتظام في كل الاتجاهات . لكن وجود حقل التثاقل ، في (b) ، يجعل سطوح الموجة تنزاح في احد اتجاهين . وهذا التشوه هو مظهر من مظاهر انحناء المكان ـ الزمان الذي شرحناه منذ قليل .

أما الشكل ٤ ـ ١٤ فيشرح الموقف بالقرب من الثقب الأسود ، حيث يمثل القرص المسنن النجم وقد ارتص جداً الى داخل كرة شفارتزشلد الممثلة بمحيط الدائرة المتقطع . فعلى مسافة بعيدة من الجرم تكون سطوح الموجة (لم نرسم سوى دائرة واحد توخياً للبساطة) منزاحة نحوه . ولدى الاقتراب من أفق الحدوث ، r_s ، ينجرف سطح الموجة بقوة أشد فاشد نحو الجرم . ويتميز أفق الحدوث بأن طرف الموجة البعيد عن الجرم لا يملك أن

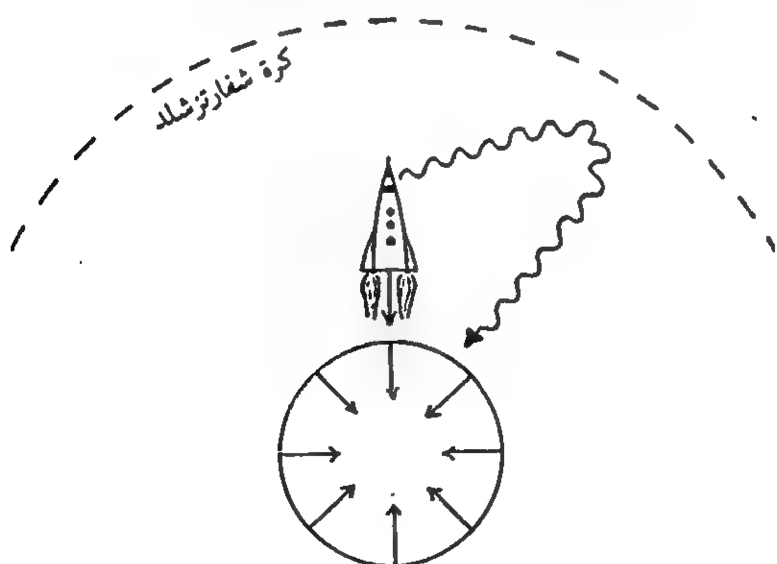
شكل ٤ ـ ١٤ . سلوك الموجة الضوئية في جوار ثقب أسود . فضمن كرة شفارتزشلد (الدائرة المتقطعة) يتجه الضوء نحو مركز الجرم ولو كان صادراً نحو الجهة الأخرى . فالأحداث التي تقع ضمن هذه المنطقة من المكان ـ الزمان لايراها أحد من الموجودين خارج هذه المنطقة ! بل يرى فقط مايقع خارج الدائرة المتقطعة . فالمنطقة الداخلية سوداء إذن خالية ـ انها ثقب أسود .



يستمر البتة في الابتعاد عنه . وقد مثلنا هذا الظرف بوضع المنبع على محيط دائرة الضوء (وفي الشكل ٤ ـ ١٣ c تمثيل مكبر لهذا الظرف) . فالموجة ماتزال في حالة انتشار محلي بسرعة الضوء لكنها هنا مجرورة بشدة لاتبيح للضوء أكثر من أن يتسمر زمانه ويبقى في حال مراوحة بالنسبة للنجم . ونتيجة ذلك هي أن الراصد النائي عن النجم لن يرى أبداً هذه الموجة المكافحة مهما طال انتظاره .

إن هذا الوضع يشبه حال رجل يركض على بساط قابل للانزلاق بسهولة كبيرة تحت قدميه ، فكلما زادت سرعة الراكض ازدادت سرعة جر البساط له بالاتجاه المعاكس .

شكل ٤ ـ ١٥ . ضمن الثقب الأسود . لو غامر الراصد بالدخول ضمن كرة شفارتزشلد فلن يستطيع الخروج منها أبداً مهما بذل من جهود . وسيجد نفسه مجروراً لا محالة نحو الأسفل بفعل هندسة المكان ـ الزمان المتقلصة ، ولو كان في صاروخ عظيم . الومضات الضوئية المرسلة نحو الخارج تنجذب أيضاً نحو الخلف . فلا إنفلات ولا خلاص ، لأن اللمحة الزمنية التي يستغرقها سقوطه على النجم تعادل الزمن الأبدي خارج الثقب الأسود .



فالراكض هنا هو الضوء والبساط هو المكان ـ الزمان الذي يغوص ، بالمعنى الخام لهذه الكلمة ، ضمن الثقب الأسود .

إن سطوح الموجة الواقعة ضمن دائرة أفق الحدوث تنزاح نحو الداخل (باتجاه مركز النجم) انزياحاً عظيماً لدرجة أنها كلها تقع بعد نقطة المنبع (انظر الشكل ٤ ـ ١٣ d المكبر) . وهذا يعني فيزيائياً أن ماصدر من الومضة الضوئية باتجاه النجم وما صدر بالاتجاه المعاكس يتجهان كلاهما عملياً نحو مركز النجم رغم بقائهما منفصلين بسرعة الضوء . وهذا يدل على أن الحدث الذي أصدر الضوء لايمكن أبداً أن يُرى من خارج الثقب الأسود . فليس لهذه الأمواج خلاص من ربق هذا الثقب . وكلما توغلت فيه ازدادت شدة انجرافها إليه ، فهي تهوي نحو مركزه بأسرع من لمح البصر .

ولما كان من المستحيل على أي جسم مادي أن يتجاوز سرعة الضوء ، فمن الواضح أن أي راصد يجد نفسه ضمن واحدة من دوائر الضوء لابد أن يظل فيها وهي تنقض نحو مركز الجرم . وعلى هذا فانه ، هو أيضاً ، سينجرف لا محالة نحو هذا المركز ، وحتى لو كان ضمن أعظم الصواريخ اندفاعاً في العالم ، فإنه لن يستطيع بتاتاً أن يهرب نحو العالم الخارجي ، ولا حتى أن يراوح في مكانه . ولاقوة تستطيع أن تحول بينه وبين الاندفاع نحو الهاوية ، فما من شيء قادر على الخروج من الثقب الأسود . فهو سيظل الى الأبد حبيس أمنع السجون في هذا العالم ، وعاجزاً حتى عن أن يخبر بمصيره أحداً من العالم الخارجي . والنجم نفسه ، كشيء مادي ، يشاركه هذا المصير فيرتص على نفسه في قدر محتوم .

هذا ورغم أن تفاصيل أطوار هذا الضمور تتعلق بعض الشيء ببنية النجم وبنائه الداخلي إلا أن حالة التجمد المصيرية ، كما تُرى من موقع ناء ، مستقلة عنها تماماً . وبسبب الانزياح الثقالي لطيف النجم نحو الأحمر فإن نور سطحه يخبو بسرعة أُسّية ، ولن تمضي أكثر من بضعة أجزاء من ألف جزء من الثانية حتى يختفي نوره تماماً ولا نعود نرى من السطح الضامر سوى ظلام دامس ، ثقب أسود . وعلى هذا يستحيل علينا أن نعلم ، من النظر الى الثقب الأسود ، من أي شيء هو مصنوع ، فالثقبان الأسودان سيان إذا كان لهما كتلة واحدة .

إنهما سيان لدرجة أننا لانستطيع أن نميز بينهما ولو بقياس أحرج المفعولات

الفيزيائية ، كالقوى النووية والحقول المغنطيسية . فبموجب النظرية الراهنة ، وسواء كان الثقب الأسود مكوّناً من المادة العادية أو من المادة المضادة أو حتى من نترينوات ، يستحيل على المرء أن يستشعر أي فرق بينها بأية وسيلة من الوسائل الفيزيائية المعروفة .

قد يكون من الممتع أن نفهم لماذا يستعصي الثقب الأسود على أي راصد يريد أن يعرف مكوِّناته . فلا جدوى من محاولة إدلاء حبل فيه يحمل كلّاباً ينتزع عيّنه من سطحه ، لأن الجذب الثقالي الشديد سيمزق طرف الحبل المتدلي ويبتلعه مع كلابه مهما كانت مادته متينة . كما أن إرسال صاروخ جبار يذهب نحو السطح الذي يتقلص ويعود بحفنة منه مشروع فاشل . لأن السطح ، عند اقتراب الصاروخ منه ، سيكون مرجعاً في حالة سقوط حر وسيمر عبر أفق الحدوث جارفاً الصاروخ . وبعد تشكل الثقب الأسود بفترة وجيزة لن يستطيع الصاروخ أن يبلغ سطح الجرم قبل أن يخترق أفق الحدوث نحو الداخل ، وسيكون عليه عندئذ أن يلاحق المادة المتراجعة عبر كرة شفارتزشلد ، وسيعجز عن العودة إلى العالم الخارجي بعيِّنة من النجم .

ولا جدوى أيضاً من إنارة سطح الجرم بارسال ومضة ساطعة الى الثقب الأسود . لأن النور سيلقى مصير الصاروخ ، فيخترق أفق الحدوث وتمسك المادة المتراجعة في تقلصها بالنور المنعكس وتجرفه بثقالتها المفرطة نحو الأسفل الى مركز الجرم .

هذا وإن كل محاولة تهدف الى إلصاق «علامة» بالثقب الأسود محاولة فاشلة . فلو وضعنا ، مثلاً ، شحنات كهربائية بتوزع معين على المادة أثناء تقلصها ، فإن هذه الشحنات لن تزول باقترابها من كرة شفارتزشلد ، لكن الحقل الكهربائي الذي تولِّده في المنطقة الخارجية يأخذ شكل ألياف متوازية مشوهة بفعل انحناء الفضاء حول الجرم وبشكل تُرى فيه الشحنات من موقع ناء مجمعة في مركز المادة . وبذلك يتعذر علينا بعدئذ «قراءة» بنية توزع الشحنات . وقد تم إنجاز حسابات تهدف الى امتحان «إمكانية قراءة» كل أنواع «العلامات» وذلك باستخدام القوى الشديدة والضعيفة والكهرطيسية على حد سواء . وقد تأكد في كل هذه الحالات أن الكتلة الكلية والشحنة الكهربائية الكلية هما وحدهما اللتان تتركان بصمات في عالم الفيزياء الخارجي . أما ما سوى ذلك من بنى ومعلومات فتنمحي أخبارها خارج هذا الرصيص .

لقد عُممت هذه الاعتبارات على حالة الارتصاص اللا كروي . وتدل الحسابات على أن الجرم ، إذا كان يملك «أوراماً» ، فإن هذه الأورام لا تزول لكنها في الواقع تنمو . ولا جدوى ، مع ذلك ، من وسم الثقب الأسود بنموذج من هذه الأورام ، لأن الفضاء المنحني حول الجرم يفعل هنا أيضاً فعله في جعل هذا النموذج غير مقروء على مسافة نائية . فالثقب الأسود ، مهما كان شكله ، كروي بالنسبة للراصد النائي .

ونستطيع الآن أن نفهم سبب إطلاق اسم «الثقب» على مثل هذا الكائن . فبالرغم من أن المادة المرتصة تبدو ، من بعيد ، واقفة وقفة الخلود في كرة شفارتزشلد ، إلا أن طبيعة هذه المادة لاتبدو قابلة للتحري . وليس لبنيتها أي تأثير فيزيائي في مناطق الفضاء النائية ـ إنها منزوية خارج هذا الكون . والكرة المظلمة التي تخلّفها تشبه ثقباً في الفضاء ، ثقباً أسود بالضبط .

لقد ركزنا القسط الأعظم من بحث الارتصاص الثقالي على مظهر الارتصاص المادي من مسافة نائية . ومهما بدت هذه الرؤية غريبة ، فإن معاناة الراصد المثبت على سطح الجرم وهو يتقلص هي المعاناة الغريبة حقاً .

فعندما يكون الراصد في حالة سقوط مع المادة وهي تتقلص فإن ثقالة سطح الجرم تشتد بالتدريج . ولئن كانت هذه الثقالة المتعاظمة عديمة الأثر محلياً على الجسيم الذي يسقط بحرية ، إلا أن الجسم الممتد ، كالراصد الفعلي ، لابد أن يشعر بفروق الشدة (مفعول المد والجزر) بين مختلف نقاطه ، وذلك للسبب التالي . إن النجم المتقلص مرتص لدرجة أن شدة قوة التثاقل ومنحاها يتغيران حتى في سلّم الجسم البشري . فإذا كان يسقط وقدماه في الأسفل فإن جسمه سيمتط لأن قدميه تكونان أقرب الى النجم من رأسه . وهو ، فوق ذلك ، سيتقلص طوله بسبب تقلص الفضاء الذي هو فيه . لنفترض أن الراصد صغير جداً ومتين البنية لدرجة أن يتحمل كل هذه القوى الساحقة الممزقة ولفترة قصيرة . إنه ، أثناء سقوطه ، سيرى حوله المنظر مستمراً في امتلاك بنية معقدة ، ربما مناطق ذات شحنة كهربائية ـ أي أن الراصد الساقط يرى كل الأشياء غير المرئية من العالم الخارجي .

إن المشهد حول الراصد يتغير عنيفاً وجذرياً بدخول مفعولات الضغط ، لأن المادة ، عندما تُصنع صلبة في الظروف العادية، تستطيع مقاومة الانسحاق . على أننا رأينا في

الفصل الثاني أن المادة المتحركة بسرعة قريبة من سرعة الضوء لا يمكن أن تكون صلبة تماماً لأن انتقال الآثار الفيزيائية لايمكن أن يحدث بأسرع من الضوء . وعلى هذا فإن المادة ، التي لا تقبل الانضغاط وهي في حالة سكون ، تذعن لهذا الانضغاط عندما تسقط بسرعة كبيرة في الثقب الأسود . وهكذا فإن المادة ، مهما كانت صلبة ، تستمر في الانضغاط لدى سقوطها في الثقب الأسود ، لكن الضغط ، هو أيضاً ، منبع ثقالة في النسبية العامة . فمن قبيل المفارقات إذن أن يكون الجسم المقاوم مسوقاً عملياً بشدة نحو الداخل . ومهما بُذل من جهود لمقاومة السقوط نحو الداخل فإن كل المواد (بما فيها الراصد وصاروخه) لابد أن تصل الى مركز الثقب الأسود الكروي ذي الكتلة النجمية وذلك في غضون جزء من عشرة آلاف جزء من الثانية (زمن مقيس) بعد اجتياز أفق الحدوث .

إن هذه النتيجة تثير سؤالاً يتضمن لغزاً من أعظم الألغاز في العلم الحديث . ماذا يحدث في مركز الثقب الأسود عندما تبلغه المادة في نهاية المطاف ؟ إن كثيراً من الناس يضربون صفحاً عن هذا السؤال بحجة أن ما يحدث في قلب الثقب ، مهما حدث ، لايمكن أن يؤثر بتاتاً في العالم الخارجي عنه . لكن مثل هذه الحجة لا تشبع فضول الباحث العلمي ، وقد جرت محاولات عديدة للإجابة عن هذا السؤال المحير .

وقبل أن نعرض هذه المحاولات ننبه القارىء الى أن مناقشتها من قبيل التكهنات . وذلك أن نظرية النسبية العامة ، التي استُمدت منها كل الدراسات التي تعالج الثقوب السوداء ، ليست سوى نظرية . وقد اجتازت نبؤاتها الامتحان بنجاح في الحقل التثاقلي للمنظومة الشمسية . لكن الثقالة ضمن الثقب الأسود أعظم بمليارات المرات . ولا أحد يعلم مدى صحة هذه النظرية علم اليقين ، ولا ماهي السمات التي تتبقى منها إذا اكتشفنا نظرية أحسن منها . إن نظرية النسبية جميلة جداً ، ويعتنقها معظم الفيزيائيين كأحسن ما لديهم في مجال توصيف الثقالة . لكن لكل النظريات حدوداً . ولا بأس من أن نتسلى بالسير مع النسبية العامة الى مداها ، فقد نكتشف أشياء هامة على الطريق . ولا خيار لنا في طريق سواه للتكهن بما يحدث ضمن الثقب الأسود ، اللهم إلا أن نسقط فيه . وعلينا ، بعد كل شيء ، أن لاننسى أننا نتحدث عن عالم ثقوب سوداء نموذجية ، لا عن العالم الفعلي .

عندما يأخذ الجرم في السير في طريق التقلص المحتوم تتزايد كثافة مادته أسرع فأسرع ، ولا يلبث أن يبلغ انضغاطه قيماً خيالية تصبح معها خواصه مجهولة تماماً . وتتعاظم أيضاً فروق الثقالة وانحناء الفضاء على سطح المادة المتقلصة لدرجة كبيرة قد تؤدي الى انسحاق كل بنية ممكنة . إن نظرية النسبية تتنبأ بذلك تحديداً ، واذا لم يحدث للمادة شيء غريب جداً فإن هذا الارتصاص لن يقف عند حد . وكما يحدث ، كل مرة نسترسل فيها مع نظرية فيزيائية الى مطلق مداها ، أن نصل الى نتائج لا عقلانية ، فإننا هنا أيضاً نصل الى نبؤة لا عقلانية تقول إن مادة النجم كلها قد انحصرت في نقطة واحدة ، بالمعنى الرياضي لهذه الكلمة . وفي هذه النقطة تصبح الكثافة وانحناء الفضاء لا متناهيين في الكبر . يطلق على مثل هذه النقاط اللا عقلانية اسم المتفردات . فالمتفرد ليس جرماً ، إنما هو مكان تلقى فيه الفيزياء المعروفة حتفها .

لقد افتُرض مرة أن المتفرد نتيجة للطبيعة البسيطة للنموذج الذي استُخدم لدراسة الارتصاص الثقالي . فنحن ، بعد كل شيء ، عندما نلزم النجم المتقلص بأن يظل دوماً كروياً تماماً ، فلا خيار أمامه إلا أن يؤول الى نقطة ، إذا لم يحدث شيء يوقف ارتصاصه . وقد بدا من الحكمة افتراض أن المادة ، في جملة فعلية ، يمكن أن تقترب من المركز كثيراً لا أن تمر عبره . كما أن ظهور المتفرد لا يبدو ، في نهاية المطاف ، متوقفاً بشكل حاسم على نموذج التقلص المادي المعتمد . فلقد برهن رياضيان بريطانيان ، هوكنغ S.Hawking وبنروز R.Penrose ، في سلسلة من النظريات تتناول حصراً البنية التوبولوجيةللمكان ـ الزمان ، على أن تشكل متفرد من نوع ما أمر محتوم ، مالم تعانِ طاقة المادة المتقلصة وضغطها تغيرات بعيدة الاحتمال جداً .

لكن هذه النظريات لا تقدم ، مع الأسف ، سوى معلومات قليلة جداً عن طبيعة المتفرد الذي يتشكل . كما أن مفهوم المتفرد المستخدم في هذه النظريات أقل دقة بكثير من ذلك الذي يحدث في تقلص كروي . وكل ما يمكن أن يقال هو أن نوعاً من المسار الجسيمي عبر المكان ـ الزمان سيجد نهاية محتومة . أي أن الجسيم الذي لا يسقط فعلاً على طول هذا المسار لا يمكن أن يبقى في المكان ـ الزمان . ويُعبر أحياناً عن ذلك بالقول إن المكان ـ الزمان يصنع لنفسه حدوداً أو إنه يلقى نهايته في المتفرد . وفي هذا الصدد يُفترض أن كل

مادة تصادف متفرداً تغادر المكان ـ الزمان دفعة واحدة ، ونظريات هوكنغ ـ بنروز لا تقول إذا كانت المادة المتقلصة سترتطم فعلياً بالمتفرد أم لا . لكن المادة لو عجزت عن مغادرة المكان ـ الزمان عن هذا الطريق فهي ، على كل حال ، لاتستطيع أن تعود القهقرى الى عالمنا من جديد ، لأنها حبيسة أفق الحدوث الى الأبد . وهناك نموذج آخر للثقوب السوداء أكثر عمومية من حل شفارتزشلد ويسمح للثقب أن يدور وأن يحمل شحنة كهربائية . وبعض هذه الحالات الخاصة المثالية تظهر خاصة غريبة هي أن المادة يمكن أن تتحاشى المتفرد وتمر الى مناطق جديدة من المكان ـ الزمان تتصل بعالمنا عبر أعماق الثقب الأسود . إن هذه «العوالم الأخرى» مستترة ، طبعاً وراء أفق الحدوث . والنماذج الخاصة التي من هذا القبيل تفيد في إعطاء فكرة عن طبيعة المكان ـ الزمان ، فلا يجب أن نعتبرها نماذج للعالم الفعلي .

لا ريب في أن التنبؤ بالمتفردات في المكان ـ الزمان له نتائج مقلقة عميقة . فنحن لا نستطيع أن نتنبأ بما يخرج منها ، لأن هذه المناطق تخرج عن سلطة الفيزياء المعروفة . إن مايحدث في جزء من المكان ـ الزمان في المستقبل السببي للمتفرد أمر فوق طاقة تنبؤاتنا .

إن هذه السمة اللا مستساغة للمتفردات جعلت بنروز يقترح فرضية «الرقابة الكونية» . وهذه الفرضية تمنع تشكل المتفردات مالم تكن محتواة ضمن أفق الحدوث . والمتفرد ضمن الثقب الأسود عاجز عن أن يغزو خارج عالمه بتأثيرات مجهولة . وقد دلت الدراسات الرياضية على أن الرقابة الكونية فرضية قريبة من الصحة ، لكنها ماتزال بحاجة الى إثبات مقنع .

إذا أخفقت الرقابة الكونية ، ولو مبدئياً ، يصبح من الممكن تشكل متفردات عارية (مرئية من مسافة نائية) . وقد عالج بعض الكتاب بتشاؤم الكارثة التي يمكن أن تحل ببقية العالم نتيجة لذلك . وعلى كل حال يجب أن لاننسى أن النظرية التي نحن بصددها لا يمكن أن تكون سوى فكرة تقريبية . ففي مجال الصغائر ، مثلاً ، التي من رتبة 10^{-33} سنتيمتر تتدخل مفعولات كمومية (نناقشها بايجاز في الفقرتين التاليتين) تغير الثقالة بشكل تعجز النظرية الراهنة عجزاً تاماً عن توصيفه . ولا أحد يعلم ماستقوله الثقالة الكمومية عن المتفردات . وقد يقدم النظريون ، في السنوات القليلة المقبلة ، صورة أخرى للمتفرد

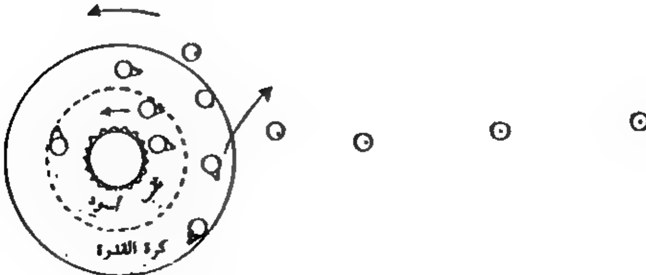
يختلف كلياً عن كل ما ذكرنا.

٤ ـ ٤ الثقب الأسود كمركز إنتاج طاقي

إن ثقب شفارتزشلد الأسود ليس النوع الوحيد من الثقوب السوداء الممكنة. فالنظريون يعرفون أنواعاً أخرى. وهذه الأنواع يمكن، مبدئياً، أن تتشكل من مادة مشحونة بالكهرباء أو دوارة على نفسها كالدوامة. والنموذج العام للتقلص ولأفق الحدوث وللمتفرد لا يختلف، في هذه الأنواع الأخرى، عما رأيناه. على أن سمات ساحرة جديدة تظهر عندما نسبر بالرياضيات بنيتها المكانية ـ الزمانية.

إن آثار الدوران على خواص المكان ـ الزمان حول الثقب الأسود الدوّام مشروحة في الشكل ٤ ـ ١٦. وهذا الشكل يمثل مقطعاً للثقب الأسود بمستو عمودي على محور تدويمه ويمر من مركزه. إن سطوح الموجة الضوئية هي، هنا أيضاً، مشدودة نحو الداخل باتجاه المركز. لكن الدوران الدوّامي للجرم من شأنه أن يجر معه أيضاً سطوح الموجة. وبذلك ينضاف إلى انزياح سطوح الموجة نحو المركز انزياح جانبي في

شكل ٤ ـ ١٦. ثقب أسود دوّام. إن سطوح الموجة الضوئية مشدودة نحو الداخل وإلى المناطق المحيطة. فضمن الدائرة الخارجية (الحد السكوني) يكون الشد قوياً لدرجة أن كلا الموجتين، الدائرتين في جهة التدويم أو في عكسها، تتحركان في عكس اتجاه عقارب الساعة. الومضات الضوئية في أطراف سطح الموجة البعيدة عن مركز النجم يمكن أن تهرب إلى الراصد النائي من هذه المنطقة. أما في الداخل، ضمن الدائرة المتقطعة، فإن الشد نحو المركز قوي لدرجة ان أطراف سطح الموجة الواقعة في عكس اتجاه مركز النجم تتحرك نحو الداخل. تلك هي، من الثقب الأسود، منطقة من المكان ـ الزمان لا يمكن للضوء أن يخرج منها.



اتجاه الدوران يطرأ على الدوائر المرسومة في الشكل. فمن شأن الدوائر الواقعة ضمن مسافة معينة من المركز، تسمى الحد السكوني، أن تنزاح برمتها إلى داخل الدائرة المتقطعة. فالراصد الموجود في هذه المنطقة ضمن دائرة الضوء، والمحكوم بأن يبقى ضمنها، سيجد من المستحيل أن يلزم مكانه بالنسبة لراصد ناء بعيد عن الثقب الأسود. ونصور حالته بأنه مجروف في دوامة فضائية. كل جسيم مادي يقع في حبائل هذه الدوامة سينجرف في دردور فضائي. ولا قدرة لأي صاروخ جبار، أو أية قوة في العالم، على منع الجسيم من الانجراف في هذا الدردور، وهذا الانجراف يتم فعلاً بأسرع من الضوء بالنسبة للراصد النائي.

ورغم الانجرار الذي لا يقاوم في هذا الدردور، فما زال هناك أمل للمرء الذي يغامر في الدخول إلى هذه المنطقة، أن يخرج منها ويعود إلى مسافة مأمونة. وسبب ذلك واضح في الشكل ٤ ـ ١٦. فرغم انزياح الدوائر كلياً إلى داخل الدائرة المتقطعة، لا يتجه الانزياح نحو مركز الجملة بالضبط، بل جانبياً. وطرف سطح الموجة البعيد عن المركز لا ينفك يتحرك تدريجياً نحو الخارج.

إن بعض الموجات الضوئية تستطيع أن تفلت بفضل ذلك، وهذا ما يمنح الراصد المتحرك بأبطأ من الضوء أملاً بالافلات. أما بالقرب من المركز فيوجد أفق حدوث حقيقي، وضمن هذا السطح يكون الشد قوياً بما يكفي لمنع انفلات أي ضوء وأية مادة.

تسمى المنطقة العجيبة المحصورة بين الحد السكوني وافق الحدوث هذا، كرة القدرة ergosphere، وذلك بسبب الإمكانية العجيبة التالية التي اكتشفها الرياضي بنروز. إذا انكسر الجسم، أثناء إقامته في هذه المنطقة، إلى قطعتين، وبحيث تسقط إحداهما نحو داخل الثقب الأسود، فإن الحساب يدل في هذه الظروف على أن القطعة الأخرى تبرز بطاقة أكبر من تلك التي دخلت بها! والذي يحدث هو أن قسطاً من طاقة الثقب الأسود الدورانية ينتقل إلى القطعة البارزة. ولهذا السبب استحقت هذه المنطقة اسم كرة القدرة. ومن الممكن مبدئياً أن تزداد طاقة الجسم البارز بكمية تساوي كل الطاقة السكونية للقطعة التي تسقط، مما يجعل الثقب الأسود الدوّار أعظم آلة معروفة قدرةً على تحويل الطاقة. فيا خجلة الاندماج النووي الذي يغذي الشمس ويحقق هذا التحويل بمردود لا يتجاوز ١٪

أمام هذا المردود الذي يبلغ ١٠٠٪ !

إن أثر هذه العمليات المحيطية على الثقب الأسود نفسه يتجلى في إبطاء سرعة دورانه بعض الشيء . وهذا مايجعل نضح الطاقة بآلية بنروز محدوداً . وبالرغم من ذلك أمكن حبك قصة اسطورية من هذه العملية تتكلم عن حضارة خيالية اختارت لنفسها وطناً حول ثقب أسود دوار . فهم ينقلون نفايات تقنياتهم وقماماتهم كل يوم الى كرة القدرة في شاحنات ترسل بها عبر أفق الحدوث وتعود محملة بالطاقة المكافئة لهذه الفضلات لتغذية المجتمع بالطاقة اللازمة . فالثقب الأسود الدوار هو أنجع الآلات ذات الوظيفة المزدوجة . فهو آلة لا تكتفي بتخليص المجتمع من كل مادة غير مرغوبة بل تدفع عملياً ثمنها على شكل طاقة . إن الثقب الأسود مركز إنتاج طاقي يقتات بكل شيء ! .

إن صورة الثقب الأسود كآلة طاقية تذكرنا بالموقف الذي يجابهه مهندسو القرن العشرين وفيزيائيوه إزاء مهمة فهم المبادىء العامة التي تتحكم في المردود والعمل اللذين تقدمها الآلات الأرضية العادية . فالدراسة المعمقة للآلات الحرارية ، أي التراكيب القادرة على تحويل الطاقة الحرارية الى عمل ميكانيكي أو العكس ، تقود الى فرع من العلم نسميه اليوم الترموديناميك . وهذا موضوع مركزي في فهم طبيعة الزمن ، وقد كنا ناقشناه بتوسع أكثر في الفصل الثالث . وبمناسبة المناقشة الراهنة يكفي أن نقول إنه قد اكتُشف مبدأ عام جداً وأساسي يسمى المبدأ الثاني في الترموديناميك . يقول هذا المبدأ بأن الأنتروبية الكلية لجملة فيزيائية معزولة لا يمكن أن تتناقص . وهو ، عندما نطبقه على الآلات الحرارية ، يقول بأن العمليات التي تعطي أعظم مردود طاقي هي تلك التي تنحفظ فيها الأنتروبية (تسمى العمليات العكوسة) . وفي الواقع العملي تنزع العمليات الى زيادة الأنتروبية الكلية بعض الشيء . وهذا نموذج للاتناظر الزمني الذي ناقشناه في الفصل السابق . إن الأنتروبية تنحفظ أثناء ذلك .

إن للثقوب السوداء خاصية متميزة في اللا تناظر الزمني ، كنتيجة للامتيازات التي يتمتع بها أفق الحدوث . لنتذكر أنه سطح لايقبل من الطاقة سوى ما يخترقه نحو الداخل ،ولا خروج منه أبداً . وهذا يعني ببساطة أن الثقب الأسود لايتطور ، على مايبدو ، الا نحو الكبر ، لا نحو الصغر ، عندما تدخل الأشياء فيه . وكقياس كمي

لاتساع الثقب الأسود تعتمد مساحة سطح أفق الحدوث . وقد برهن هوكنغ على نظرية هامة تقول إن مساحة أفق الحدوث لايمكن أن تتناقص مهما حدث داخل الثقب الأسود من أمور . وهذه النظرية تقابل مباشرة قانون الترموديناميك الثاني ، وتقوم فيها مساحة أفق الحدوث مقام الأنتروبية هناك . ويمكن استخدامها لايجاد حدود المردود في عمليات الثقب الأسود . وكمثال على ذلك نسوق العملية التي يندمج فيها ثقبان أسودان متساويان من نوع شفارتزشلد . إذ يدل حساب سهل على أن الطاقة الكلية التي يمكن استخراجها ، من هذا الدمج وفي ظروف المردود الأعظمي (تلك التي لاتتغير فيها مساحة أفق الحدوث) ، تساوي ٢٩٪ من الكتلة ـ الطاقة الأولية .

لقد كان تشبيه الثقب الأسود بالآلة الحرارية يثير شيئاً من السخرية لدى النظريين حتى ماض لا يزيد عن بضع سنوات . ولم يخطر بالفعل على بال أحد إمكانية تناول الثقب الأسود كآلة حرارية ، حتى برز اكتشاف مذهل لم يقتصر على توكيد الصلة الترموديناميه ، بل يوحي أيضاً بمبادىء فيزيائية يمكن أن تمتد الى أبعد بكثير من الحدود الأكاديمية الضيقة لنظرية الثقب الأسود ، لتلقي ضوءاً جديداً على طبيعة الثقالة نفسها .

هناك ، أولاً ، أولى الرياح التي هبت على الصلة الترموديناميه فاظهرت أنها صلة تشابه بحت . فمفهوم درجة الحرارة ، مثلاً ، وهو الحاضر دوماً في كل ظاهرة حرارية ، لايبدو أنه ينطبق جيداً على الثقوب السوداء ، وسبب ذلك بالضبط هو أن المفروض فيها أن تكون سوداء . إذ ليس للجسم الكامل السواد درجة حرارة ، أو قل إنها الصفر . والثقب الأسود عليه أن يكون كامل البرودة ، أبرد من كل شيء سواه في هذا الكون . فكلمة ساخن ، عندما نصف بها ثقباً أسود ، تبدو فاقدة معظم معناها .

إن أول دليل على أن الثقب الأسود قد لا يكون أسود تماماً جاء من دراسة تشبه دراسة بنروز في استخراج الطاقة ، لكنها تنطبق على الأمواج الضوئية بدلاً من الجسيمات المادية . فهنا يحدث ازدياد مشابه في طاقة الضوء ، معروف باسم فرط الاشعاعية ، وهو يشبه آلية إشعاع اللازر من عدة وجوه . إن اللازر تركيب من شأنه أن يجعل الذرات تشع ضوءاً (هو الضوء اللازري) وذلك بأن نرسل عليها ضوءاً حافزاً أغزر منه وله التواتر نفسه . وآلية هذا الاشعاع المحفوز لا يمكن أن تُفهم إلا من خلال القوانين الفيزيائية المختصة بالجمل المادية

المجهرية - وهي التي تسمى نظرية الكم . وسنقول شيئاً عن هذه النظرية في الفقرة القادمة . لكننا نذكر منذ الآن أنها تدل على أن الذرات يمكن أن تُصدر إشعاعاً ضوئياً تلقائياً ، أي دون إشعاع حافز مسبق ، وهذا شأن الاشعاعات الصادرة عن معظم الأجسام المشعة (كالشمس مثلاً) .

يرى فيزيائي النجوم السوفييتي زلدوفيتش Ya.B.Zeld'ovich أن الثقب الأسود الدوار إذا دخل في طور فرط اشعاع مضخَّم يحمل طاقة ضوئية فلابد من أن يصدر ضوءاً تلقائياً . وكان هذا أول اتجاه بوجوب تطبيق نظرية الكم على الثقوب السوداء . ثم اضطلع الفيزيائي الكندي أنرو W.Unruh بهذه المهمة الشاقة فأكد رأي زلدوفيتش وتحقق رياضياً من أن الثقب الدوار لابد من أن يتوهج فعلاً بضوء واهن . وواهن هي الصفة الملائمة ، لأن الطاقة الصادرة بهذه الآلية من ثقب أسود ذي كتلة تساوي كتلة الشمس تكاد تكون أضعف من أن تُستبان . لكن المهم أن مخرجاً مبدئياً قد وُجد ، وأن الآلية التي تتيح ظهور الأشعاع أصبحت مفهومة بكل معنى الكلمة . لكن نظرية العمليات الكمومية في المكان - الزمان المنحني ماتزال في طور التجريب . بيد أن القارىء الفضولي يمكن أن يأخذ فكرة عن الفيزياء المنضوية فيها .

إن ظهور الاشعاع الضوئي التلقائي من الثقب الأسود الدوار يعني أن قسطاً من الطاقة الدورانية قد تحول الى طاقة كهرطيسية . ويمكن أن نرسم في الذهن صورة تقريبية جداً لهذا التحول ، وذلك بأن نتخيل دردور فضاء حائماً حول الجرم الدوّام . إن الجر العنيف الناجم عنه يرجّ الحقل الكهرطيسي ويولد تجعدات طاقية ، أمواجاً كهرطيسية . وهو يرج النترينوات والأمواج الثقالية أيضاً . إن الاشعاع الموصوف هنا لايصدر عن المادة - المصدر الشائع للاشعاع الضوئي ، لأن المنطقة المحيطة بالثقب الأسود خالية من كل مادة ، بل إن هذا الاشعاع ينبثق مباشرة من الفضاء الخالي نفسه ! وهكذا ، وبالمعنى الحقيقي للعبارة ، يتضح أن دردور الفضاء حول الثقب الأسود الدوار ليس خفياً تماماً ، بل إنه يتوهج بكموم ضوئية واهنة .

إن هذه النتيجة ، مهما كان معناها ، لا تقدم تبريراً كافياً لافتقاد درجة الحرارة التي نحتاج اليها كيما نحسم موضوع الصلة مع الترموديناميك . فثقب شفارتزشلد الأسود ليس

دواراً وليس بالتالي منبع الاشعاع الذي يقول به زلدرفيتش ـ أنرو . كما أن هذا الاشعاع لا يملك درجة حرارة مميزة لأن طيف تواتره لا يقابل طيف تواتر جسم في حال توازن حراري . وقد سد هوكنغ هذه الثغرة في معالجة رياضية لما يبدو ، لأول وهلة ، مسألة معقدة لا أمل فيها . فقد طبق نظرية الكم ، لا على النتاج النهائي للثقب الأسود بل على آلية الارتصاص الثقالي نفسها . فأثناء تقلص النجم يطرأ الرج ذاته على الحقل الكهرطيسي ، مصحوباً بتجعدات طاقية تتدفق من الجرم المتقلص . وهنا أيضاً لا تصدر الطاقة عن المادة مباشرة ، لكن عن المكان ـ الزمان المنحني . ومما يلفت النظر بخصوص نتيجة هوكنغ هو أن تقلص النجم (تذكر أن هذا التقلص يحدث بسرعة وكأنه انفجار نحو الداخل) لتشكيل الثقب الأسود مصحوب بتقلص الاشعاع الصادر على شكل تدفق طاقي مستقل تماماً عن تفاصيل آلية التقلص . وبدلاً من أن يقع على جواب معقد حصل هوكنغ على أبسط النتائج وأكثرها أناقة .

إن الاشعاع الصادر عن ثقب شفارتزشلد الأسود له ، بالضبط والتمام ، طيف التواتر المقابل لجسم في حال توازن حراري ، في درجة حرارة لا تتعلق إلا بكتلته . تلك هي الصلة المفقودة في الصورة الترموديناميكية .

ومن هذه النتائج الجديدة يتجلى أن القوانين التي تتحكم في عمليات الثقب الأسود قد أصبحت ببساطة قوانين الترموديناميك المعروفة . فمساحة أفق الحدوث هي انتروبية الثقب الأسود . وعلى هذا فبامكان هذه المساحة أن تتناقص إذن ، ودون أن تنتهك القانون الثاني ، شرط أن تتزايد أنتروبية مايحيط بها بالكمية ذاتها على الأقل . ولهذه النتيجة صدى عميق . يمكن إذن للثقب الأسود أن ينمو متصاغراً . والواقع أنه سوف ينمو متصاغراً إذا كان صغيراً لدرجة كافية في البدء . وسبب ذلك هو الواقع العجيب المتمثل في أن ثقب شفارتزشلد الأسود يصبح أسخن عندما يشع طاقة . ودرجة الحرارة التي حسبها هوكنغ تتغير في عكس اتجاه تغير كتلة الجرم . وبتدفق الاشعاع نحو الخارج تتناقص الكتلة وترتفع درجة الحرارة ، مما يزيد في صدور الطاقة الاشعاعية . فالجملة بمجملها في حالة قلق انفجاري .

إن كل ذلك يعني أن الثقب الأسود ، إذا تُرِك لشأنه مدة كافية ، سيتبخر برمته في الفضاء دون أن يبقى منه أثر سوى ابتسامته المعهودة ! فالنجم الذي شرع في تشكيل ثقب

أسود ، بادىء ذي بدء ، قد تناثر ، على مايبدو ، في فضاء هذا العالم على صورة شلال شعاعي .

إن درجة حرارة ثقب أسود له مثل كتلة الشمس هي من رتبة ١٠^-٦ درجة مطلقة فقط . إن مثل هذا الجرم يميل الى النمو أكثر من التبخر ، لأن الاشعاع القادم من محيطه الأسخن يتدفق بمعدل أعظم من معدل تدفق إشعاع هوكنغ نحو الخارج . على أن الثقب الأسود المجهري ، المشار اليه في الفقرة السابقة ، يميل الى التبخر على مدى زمن طويل يضاهي عمر الكون . وقد يكون بعض من هذه الثقوب السوداء الصغيرة في حالة احتضار انفجاري ، حتى في الوقت الحاضر .

من المفيد أن نذكر ، في هذه المرحلة الغريبة الساحرة من الموضوع ، أننا نختبر حدود النظريات الرياضية الشائعة . كما أن الصلة الترموديناميةالمتينة ، التي اكتشفها هوكنغ وآخرون ، توحي فعلاً بأننا بدأنا نحسر النقاب عن مبادىء جديدة هامة بخصوص الثقالة ونظرية الكم . والنتائج الكمومية الجديدة مغرية وجذابة . لكننا مانزال في الحقيقة بعيدين جداً عن أي تأكيد رصدي لهذا النوع من العمليات التي شرحناها آنفاً .

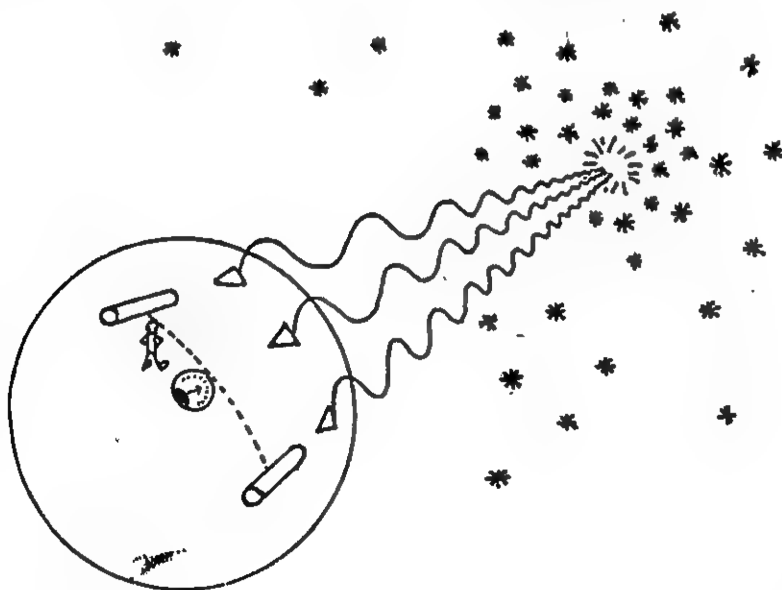
وقبل أن نختم الحديث عن الثقوب السوداء لابد من ذكر شيء عن إمكانياتنا في رصد ورؤية واحد منها . فإذا وُجد واحد عظيم الكتلة جداً في مركز المجرة فمن المحتمل أن يبتلع نجوماً بمعدل ثابت . وقانون الترموديناميك الثاني في الثقوب السوداء يتطلب عندئذ أن يزداد حجم الثقب الأسود ، بمعنى أن المادة الساقطة فيه لابد أن توسِّع مساحة أفق الحدوث الكلية . لكن الحسابات تشير الى أن قسطاً من المادة الساقطة يمكن أن يتحول الى إشعاع يبتعد على شكل أمواج ثقالية . والموجة الثقالية تقابل في الحقل الثقالي الموجة الكهرطيسية ، وكلاهما تنتشران بسرعة الضوء ، لكن الأمواج الكهرطيسية تنشأ عن الاضطراب الذي تولده الجسيمات المتكهربة المتسارعة بينما تنشأ الأمواج الثقالية عن الأجسام ذات الكتلة (الشحنة الثقالية) .

لقد بذلت في السنوات الأخيرة جهود عظيمة لصنع مرقابات (تيليسكوبات) ثقالية لـ «مشاهدة» منابع الموجات الثقالية . وتُكشف الأمواج بأبسط وسيلة يمكن تخيلها . فتجعدات الفضاء الهندسية الناجمة عن مرور الموجة الخاطف تُستخدم لتوليد اهتزاز تجاوبي

في اسطوانة معدنية . والاسطوانات الشائع استعمالها ذات طول يبلغ بضعة أمتار وتعلق بحرص شديد يهدف الى إضعاف أثر الاضطرابات الأخرى كالهزات الأرضية . وبالرغم من ذلك فإن الحسابات تدل على أن حوادث الثقب الأسود نفسه قد تعجز عن توليد أمواج ذات عنف يتيح للكواشف الشائعة أن تهتز بأعلى من مستوى الشغب ، ولهذا تُستخدم مزدوجةً وترصد حركاتها بالتطابق .

لقد كان فيزيائي النجوم الأمريكي ويبر J.Weber رائد كواشف الأمواج الثقالية . وقد أثار صخباً عظيماً عندما أعلن ، منذ بضع سنوات ، أنه اكتشف منابع أمواج ثقالية شديدة في مركز المجرة ، وساد الاعتقاد بأنها ناجمة عن حوادث تطرأ في ثقب أسود . لكن كل الكواشف التي صنعت ، بعد إعلان ويبر ، في أوربا وأمريكا عجزت عن تأكيد ذلك ،

شكل ٤ ـ ١٧ . مرقاب ثقالي . يمكن أن تصدر أمواج ثقالية عن ارتصاص ثقب أسود في مركز المجرة . إن «تجعدات الهندسة» هذه يمكن أن تحصل بحيث تولد رنيناً في قضيبي المعدن . وهناك أنواع من هذه التراكيب تقف بالمرصاد لهذه الأمواج الرهيفة ، وهي تعمل مزدوجةً للتقليل من شأن شغب الهزات الأرضية .



ويبدو أن علينا أن ننتظر جيلاً قادماً من الكواشف الأعظم حساسية قبل أن نتمكن من حسم الجدل حول هذا الموضوع .

يبدو أن ثمة أرجحية أكبر في اكتشاف ثقب أسود له مثل كتلة الشمس . ولما كان هذا الجرم أسود فليس من الممكن طبعاً رؤيته مباشرة . لكنه مايزال ذا ثقالة وهناك حظ كبير في إمكانية اكتشاف واحد يشكل مع نجم آخر جملة نجم مضاعف . والنجوم المثناة ، المؤلفة من نجمين يدوران معاً حول مركز ثقلهما ، كثيرة في مجرتنا ، فاذا كان أحد المترافقين ثقباً أسود فسيحاول انتزاع قسط من مادة رفيقه . وهذا الغاز سيشكل على الأرجح قرصاً حول الثقب الأسود تحوم مادته وهي تغوص ببطء في غياهب النسيان . وأثناء غوصه يصبح الغاز حاراً جداً ولدرجة أنه ، بدلاً من أن يتوهج بنور مرئي ، يصدر إشعاعاً سينياً .

ولحسن الحظ وبفضل تقنية الفضاء يمكن اليوم إرسال تيليسكوبات سينية في أقمار اصطناعية فوق جو الأرض . وقد أمكن بهذه الوسائل تحديد مواقع بعض الأجرام المرشحة لتكون ثقوباً سوداء في نجوم مثناة ، وأقربها لذلك موجود في مجموعة برج البجعة . وللتأكد من أن الجرم المرشح ثقب أسود لابد من التأكد أن الجرم المشع لايمكن أن يكون قزماً ابيض ولا نجماً نترونياً . والجرم نفسه لا يمكن رؤيته بل يُستدل عليه من حركة رفيقه . والمعيار المقبول الوحيد في استبعاد مايمكن أن يخدعنا يعتمد على نماذج نظرية تتنبأ بانه لا يمكن أن يكون لكليهما كتلة تزيد عن كتلة الشمس بكثير . ويمكن تقدير كتلة الجرم من حركة الجملة المثناة شرط أن نعرف كتلة رفيقه . وهذه الكتلة يمكن أن تُقدر من شدة نوره وطيفه .

بيد أن ثمة عوامل يمكن أن تشوش هذا التقدير ، وبذلك لانستطيع أن نقول سوى إن وجود ثقب أسود في مجموعة البجعة أمر محتمل .

٤ ـ ٥ عوالم الكم الزائلة

يجدر بنا أن نذكر أن مطلع هذا القرن قد شهد ، لا ثورة واحدة فقط ، بل ثورتين عظيمتين في تاريخ الفيزياء ، أو بالأحرى في الفكر البشري . فنظريتا النسبية أدخلتا تعديلاً جذرياً في خواص مفاهيم المكان والزمان والمادة في السلم الواسع . وقد صاحب

النسبية نشوء صورة غريبة جديدة غيرت معالم العالم في السلّم الصغير ، وذلك بفضل أعمال بلانك M.Planck (ألماني ، ١٨٥٨ ـ ١٩٤٨) وبور N. Bohr (دانمركي ، ١٨٨٥ ـ ١٩٦٢) وشرود نغر E.Schrodinger (نمساوي ، ١٨٨٧ ـ ١٩٦١) وديراك P.Dirac (بريطاني ، ١٩٠٢) وبورن M.Born (ألماني ، ١٨٨٢ ـ ١٩٧٠) وهايزنبرغ W.Heisenberg (الماني ، ١٩٠١ ـ ١٩٧٦) وكثيرين غيرهم. وهذه الصورة هي ، من عدة وجوه ، أكثر عمقاً وأكثر غرابة من النسبية . وهذا المنظر الثوري الجديد لعالم الصغائر ينضوى اليوم في فرع واسع من الفيزياء الحديثة يسمى ميكانيك الكم .

لكن نظرية ميكانيك الكم أصعب ، لسوء الحظ ، بكثير وأعظم تجريداً من نظرية النسبية . فهي تمتنع على الأكثرية التي لا تملك الزاد الرياضي الكافي لاستكناه جمالها ودقائقها . وليس من الممكن أن نعرض منها سوى خطوط عريضة غامضة بعض الشيء ، مما يقع ضمن أهداف هذا الكتاب . (نود أن يعذرنا القارىء في أننا ، خلال محاولة تبسيط هذا الموضوع ، سنستخدم عبارات وتشبيهات قد لا تتفق بالضبط مع أفكار كل الفيزيائيين حوله . وعلى القارىء أن يحذر من استخلاص عدد كبير من النتائج من عرض لا يبرره سوى هدفه النفعي) إن جزءاً من الصعوبة في فهم نظرية الكم سببه أن مفاهيمه وأغراضه لا تُستمد من أي حدس فيزيائي دقيق نابع من تجارب الحياة اليومية . فأشياء نظرية النسبية ، كالميقاتيات وأجهزة القياس والانشاءات الهندسية وما الى ذلك ، ذات جذور قوية في مجال الخبرة اليومية . لكن البنية الداخلية للذرة ليس لها شبيه في هذا المجال . فالعبارات التي مثل «جسيمات دائرة حول النواة» شائعة الاستعمال في وصف بنية الذرة ، لكنها تعطي الانطباع بأن الفرق الوحيد بين سلوك الذرة وسلوك الجمل الميكانيكية الكبيرة المحسوسة ، كأكر اللعب ، فرق في السلّم فقط ، وهذا خطأ مؤكد .

لقد تبين منذ أوائل هذا القرن أن قوانين نيوتن الميكانيكية (أو أيضاً نظرية النسبية الخاصة) لاتقدم تفسيراً ناجحاً لسلوك الجمل المجهرية ، كالذرات . فالقوانين الرياضية التي تفسر جيداً سلوك أكر اللعب لاتنطبق على الجمل المصغّرة . على أن البنية الذرية معروفة بالتجربة أنها تمتلك تناظرات ونظماً من صنعها الخاص المميز ، وأن أبحاثاً قد حصلت لايجاد نوع جديد من التوصيف الرياضي يأخذ في الحسبان هذه الوقائع التجريبية .

وفي أواسط عقد ١٩٢٠ أصبح هذا الاطار الرياضي ناجزاً وارتفع الى مستوى نظرية في المادة ، شاملة وجديدة ، اكتسبت اسم ميكانيك الكم .

لقد كان نجاح هذه النظرية خارقاً . فمن إنجازاتها أنها قدمت تفسيرات كمية للأمور التالية : بنية الذرة وعمليات التبعثر ، تشكل الجزيئات والروابط الكيميائية بين الذرات ، النشاط الاشعاعي والسلوك الداخلي لنواة الذرة ، تفاعل الأمواج الكهرطيسية مع المادة (كما في المفعول الفوتوكهربائي) ، عدد من خواص الأجسام الصلبة والكثير الكثير من التجارب المخبرية . وفي عام ١٩٣٠ ضم ديراك نظرية الكم ونظرية النسبية وطلع على الناس بفصل من الفيزياء كامل وجديد .

لقد غدت الصفحات الأولى من هذه الفصل نموذجاً يحتذى في العمل العلمي . ومن نظريته الرياضية في الجسيمات المجهرية النسبوية تمكن ديراك من التنبؤ بأشياء جديدة كثيرة . فنموذج الذرة (الذي بني في أواسط الثلاثينات) يتطلب وجود ثلاثة «مكوِّنات» أساسية ، أو جسيمات أولية (عنصرية) ، البروتون والالكترون والنترون وهو حيادي كهربائياً . واستطاع ديراك أن يبرهن رياضياً في نظريته على أن الالكترون دوّام على نفسه بأسلوب يستحيل حدوثه في الأجسام المحسوسة العادية . إن هذا السبين (أي الحركة الدوامية) سمة شائعة جداً في واقع الطيوف الذرية . والأمر الأكثر إثارة هو أن ديراك وجد أيضاً أن معادلته النسبوية تمتلك ، بالاضافة الى الحلول التي تصف الحركة العادية للالكترونات ، حلولاً «مرآتية» يبدو أنها تنبىء عن نوع جديد تماماً من الجسيمات . وعندما اكتشف ديراك حلوله هذه لم يكن أحد يعلم بوجود جسيمات أخرى . لكنه ، وباستخدام حجة فيزيائية ملحوظة ، اقترح آلية يمكن بموجبها أن تتخلق الجسيمات «المرآتية» . ومالبث أن ظهر إلى الوجود، عام ١٩٣٦ ، أول هذه الجسيمات ، وهو الخيال المرآتي للالكترون - إنه جسيم يساوي الالكترون في الكتلة ويعاكسه في الشحنة الكهربائية . وقد أطلق على هذا القادم الجديد اسم البوزترون ، وكان شاهداً حياً لمصلحة ميكانيك ديراك النسبوي .

لم يكن اكتشاف البوزترون سوى أول الغيث . ففي عام ١٩٣٥ تنبأ الفيزيائي الياباني يوكاوا H.Yukawa ، بالاعتماد على نظرية في البنية النووية ، بوجود نوع جسيمي آخر ذي كتلة وسطية بين الالكترون والبروتون ، وسمي الميزون meson (أي المتوسط) .

وقد كشفت التحريات عن وجود جسيم من هذه العائلة معروف باسم الميون muon ، وذلك عام ١٩٣٧ . على أن ميزون يوكاوا لم يُكتشف إلا بعد الحرب العالمية الثانية ، ويسمى اليوم بيون pion . وبالاضافة للميزونات أوحت السمات الملحوظة في ظاهرة النشاط الاشعاعي بيتا بوجود نوع جسيمي آخر ، يدعى النترينو neutriono ، ليس له كتلة ولا شحنة لكنه دوّام بالاسلوب الذي تصفه نظرية ديراك . إن تفاعل النترينو مع جسيمات أخرى ضعيف نادر جداً ـ إن معظمها يخترق الكرة الأرضية دون أن يوقفه شيء ـ مما يجعله أكثر الجسيمات المعروفة تملصاً من كل شيء .

لو اقتصر عدد الأنواع الجسيمية على البروتون والنترون والالكترون والبوزترون والميزونات والنترينوات (يوجد منها نوعان وربما ثلاثة) والفوتون (الجسيم الكمومي المصاحب للموجة الكهرطيسية) لظل لدينا بعض الأمل في توصيف العالم بجسيمات أولية حقاً يمكن أن تؤلف اللبنات الأساسية في بناء مادة هذا العالم . على أن ماكتشف منها ، بعد نهاية الحرب ، أصبح يُعد بالمئات ، وأكثرها جسيمات قصيرة الأجل زائلة (بعضها لا يعيش أكثر من 10^{-23} ثانية !) ورغم أن بعض التناظرات اللا متوقعة قد جلبت بعض الترتيب الى فوضى هذه الكائنات الجديدة ، إلا أنه لايوجد حتى الآن دليل واضح على أنها مصنوعة من مكونات أساسية مشتركة أو أن عددها النوعي غير محدود . وإن البحث عن هذه الجسيمات الجديدة ، والتعرف على خواصها ، هما الآن صناعة تستخدم تجهيزات ثمنها ملايين الجنيهات . وهذا الفرع في العلم التجريبي والنظري يعرف اليوم باسم فيزياء الجسيمات الأولية ، رغم المغالطة الواضحة في هذه التسمية .

ولكي نفهم كيف تتخلق هذه الجماعة المربكة من الجسيمات المجهرية نتذكر أن نظرية النسبية الخاصة تحكم ، بواسطة الدستور $E= mc^2$ ، التحول ذا الاتجاهين بين الكتلة والطاقة . وقد ذكرنا في الفصل الثاني كيف تتزايد كتلة الجسيم الذي نسرّعه ، بفضل هذا التحول . وثمة مظهر آخر لتحول الطاقة الى كتلة ، وهوتخلق جسيمات مادية من الطاقة . والطاقة اللازمة لهذا التخلق يمكن أن تتوفر بعدة طرائق . وأكثرها شيوعاً هو أن نؤمن أعنف مانستطيع من التصادم بين جسيمين موجودين . وآلات التسريع الحديثة ، كتلك الموجودة في المركز الأوربي للأبحاث النووية في جنيف ، قادرة على انتاج دفقات من الجسيمات

المتخلقة من جميع الأنواع بتلك الطريقة .

وبانجاز تجارب من هذا القبيل اكتشف فيزيائيو الجسيمات الأولية أنها ، بشتى أنواعها ، تخضع الى قواعد معينة تماماً عندما تتحول من نوع لآخر . وهذه القواعد تتعين بتتبع «علامات» الجسيمات ، كالشحنة الكهربائية والسبين مثلاً . والعلامات تفيد بأكثر من مجرد التمييز بين الجسيمات المختلفة . فهي غالباً منحفظة عبر تغير عدد الجسيمات ونوعها . فالعلامة المسماة بالعدد الباريوني ، مثلاً ، والتي يحملها كل نترون يمكن أن تنتقل الى البروتون عندما يتفكك النترون الى بروتون والكترون ونترينو . لكن الميزون لا يحمل عدداً باريونياً ، وعلى هذا فإن تفكك النترونات أو البروتونات الى ميزونات غير مباح ـ ولم يحدث قط فعلاً . ولدى تخلق جسيم من الطاقة فإن انحفاظ العلامات يستلزم أن يتخلق معه جسيم آخر يحمل علامات مساوية باشارات معاكسة . فالجسيمات المتخلقة من الطاقة تبرز إذن الى الوجود أزواجاً . فتخلق البوزترون مثلاً لايمكن أن يحدث إلا إذا صاحبه تخلق الكترون (ذي شحنة وسبين معاكسين) .

إن لزوم تناظر العلامة أثناء التخلق (أو الفناء) يستدعي أن يوجد لكل جسيم خيال «مرآتي» ذو علامات مساوية ومعاكسة . فيجب أن يوجد ، لا للالكترون فقط ، بل للبروتون وللنترون وللميزونات . . . الخ جسيمات مضادة . والأمر كذلك بالفعل . فالبروتون مثلاً يتخلق مصاحباً لتخلق بروتون مضاد له شحنة سالبة وعدد باريوني سالب . ويمكن للبروتون والبوزترون أن يؤلفا معاً ذرة هدروجين مضاد . والخيال المرآتي للمادة يسمى المادة المضادة . وعندما تلتقي مادة مع مادة مضادة فانهما تتفانيان وتتحولان من جديد الى طاقة ، الى فوتونات غاما . وعلى هذا فإن جسيمات المادة المضادة لاتعيش طويلاً في الوسط الأرضي المليء بالمادة ، ولا في مجرتنا التي تبدو أنها تكاد تكون مصنوعة كلها من المادة المألوفة . وليس معلوماً إذا كان الكون كله مصنوعاً من المادة ، أم يوجد مجرات من المادة المضادة .

وبعد أن أتينا على عرض موجز لبعض النتائج التجريبية التي نجمت عن نظرية الكم أصبحنا على استعداد لمناقشة الطبيعة العجيبة للنظرية نفسها .

إن نمو الميكانيك التقليدي ، بفضل نيوتن ، كان يعتمد على خاصية أساسية هي

القدرة على التنبؤ . فقد صنع نيوتن مجموعة من المعادلات لتوصيف تطور الجمل المادية الميكانيكي بمرور الزمن . فإذا توفرت معلومات كافية عن حالة الجملة الفيزيائية في لحظة ما أمكن ، مبدئياً وبالحساب ، معرفة ظروفها في الماضي والمستقبل بكل دقة . وكمثال على ذلك نذكر التنبؤ بكسوف الشمس . فجملة الأرض والشمس والقمر يمكن اعتبارها جملة ثلاثة أجسام تتفاعل مباشرة ثم معالجتها بتقريب جيد في الميكانيك النيوتني ، لأن كل الحقول والسرعات ضعيفة . فمعرفة الحالة الراهنة للمنظومة الشمسية تتيح لنا أن نحسب مواعيد الخسوف والكسوف في الماضي والمستقبل .

وهكذا وبموجب ميكانيك نيوتن يكون الكون كالة لا نعجز عن التنبؤ بما يحدث فيها إلا لأننا لانملك مايكفى من المعلومات اللازمة لفعل ذلك .

ومع حلول هذا القرن بدأ يظهر عجز ميكانيك نيوتن عن تفسير بعض الخواص المهمة للذرات وتفاعلها مع الإشعاع الكهرطيسي . ومن هنا نشأت البنية الجديدة تماماً لمفاهيم ميكانيك الكم . فقد انطلق هذا الميكانيك من إنكار القدرة على التنبؤ في هذا العالم ، بالغاً مابلغت كمية المعلومات المتوفرة . وبدلاً من اعتبار أن الحالة الراهنة لهذا العالم ستتطور في طريق مرسوم نحو حالة مستقبلية معينة تماماً (وناشئة من حالة ماضية معينة تماماً) يرى هذا الميكانيك إمكانية حالات مستقبلية وماضية عديدة . فالحالة المستقبلية للجملة الفيزيائية يجب أن تعتبر انضماماً لكل الحالات التي يمكن أن تحصل . وبدلاً من عالم مستقبلي واحد هناك عوالم مستقبلية عديدة جداً ، كل واحد منها يمكن أن يقع ، أو أن لايقع ، باحتمال معين ، معين جيداً .

إن التنبؤ في الفيزياء ، كما في الاقتصاد ، أصبح بذلك موضوعاً إحصائياً . وسواء تصورنا أن كل العوالم الممكنة تشترك في الوجود على قدم المساواة ، أم أن واحداً منها فقط هو المتنخب في كل لحظة باسلوب عشوائي ، فإن هذه المسألة تثير جدلاً فلسفياً عميقاً . وفي كلتا الحالين يستطيع الفيزيائي أن يحسب توقع أية حالة خاصة لجملة فيزيائية في أية لحظة ، باستخدام قوانين الاحتمال . فمن اليسير مثلاً أن نحسب بدقة الاحتمالين النسبيين لإصدار ، أو لعدم إصدار ، جسيم ألفا من ذرة الأورانيوم . نقول إذن إنه ، بعد ألف سنة ، يوجد عالمان ممكنان ، يتميز أولهما بذرة أورانيوم سليمة والثاني بذرة أورانيوم ناقصة

وجسيم ألفا جديد . ونظرية ميكانيك الكم تقدم وصفة رياضية لحساب احتمال كل من هاتين الامكانيتين .

إذا اعتبرنا المكان ـ الزمان في سلّم صغير لدرجة كافية ، فمن الممكن لأنواع عديدة مختلفة من العوالم أن تظهر وأن تختفي ثانية ، وكأنها صور شبحية . يشار أحياناً الى هذه التظاهرت الوجيزة باسم العوالم التقديرية ، لأنها حالات زوال لا نلمحها بل نقدرها تقديراً . وحتى في الخلاء التام ـ في فضاء خال بكل معنى الكلمة ـ وخلال برهات زمنية قصيرة بما يكفي ، يمكن لكل أنواع الجسيمات أن تأتي الى الوجود وأن تتلاشى من جديد وتزول . إن عمر هذه الجسيمات التقديرية الشبحية قصير لدرجة لا تصدق . فالبروتون التقديري مثلاً لايعيش أكثر من حوالي 10^{-24} ثانية ثم يزول . وعلى هذا ، لن نستطيع بعد الآن أن نفكر بالخلاء على أساس أنه «خال» ، بل على أساس أنه مملوء ، بمقدار ما يسع ، بآلاف الأنواع المختلفة من الجسيمات ، تتشكل وتتفاعل وتزول في بحر يعج بنشاط لا يتوقف . تلك هي صورة المكان ـ الزمان كما يرسمها ميكانيك الكم ، تموّج عنيف وتفاعلات نشيطة .

وليست هذه الصورة الكمومية مجرد نموذج فكري . فكثير من المفعولات الفيزيائية تحدث نتيجة تموج الخلاء هذا . فوجود المواد الناقلة للكهرباء يغير من تموجات الفوتونات («جسيمات» الاشعاع الكهرطيسي) ويؤدي الى ظهور قوى تتسلط على النواقل ويمكن قياسها .

إن هذا المفهوم الكمومي الجديد الساحر للمكان ـ الزمان ناجم عن اندماج ميكانيك الكم والنسبية الخاصة . ومن المتوقع أن يؤدي اندماج ميكانيك الكم والنسبية العامة الى تعديلات جذرية في صورة المكان ـ الزمان .

وفي السنوات الأخيرة بذل النظريون جهداً كبيراً لفهم طبيعة الجسيمات الأولية في المكان ـ الزمان المنحني للنسبية العامة . وإن ماأُحرز من تقدم طفيف في هذا المجال يؤكد شدة ارتباط الفكرة الحالية عن هذه الجسيمات بالمكان ـ الزمان المنبسط للنسبية الخاصة . ذلك فإن الأبحاث الجارية في الاتحاد السوفييتي وفي الولايات المتحدة توحي بشدة بأن ق الجسيمات الأولية في حقل ثقالي شديد يمكن أن يكون عظيم الأهمية في خواص العالم

الكوني في السلّم الكبير . وبالاضافة الى ذلك يوجد ، في ظروف الثقوب السوداء ، مايوحي بأن مثل هذا التخلق الجسيمي لابد أن يسبب تبخر الثقب ، كما ذكرنا في الفقرة السابقة .

ومن الممكن ، في سوية أعمق ، أن نطبق نظرية ميكانيك الكم على الحقل الثقالي نفسه ، وهذا ماندعوه عادة استكمام المكان ـ الزمان . والنشاط قائم على قدم وساق في هذا المجال المثير منذ سنوات عديدة . لكن معضلاته الرياضية ، من حيث التقنية والمبدأ معاً ، معقدة وعميقة . فالتثاقل يفصح عن نفسه كقضية هندسية في المكان ـ الزمان ، ودخول نظرية التثاقل الكمومية يضعنا أمام انضمام عالمين لهما هندستان مختلفتان . والهندسة المتوقعة لابد أن تحسب احتمالياً كالعادة . وهكذا يغدو الخلاء ، مرة أخرى ، مليئاً بالتموجات . لكن البنية الهندسية هي التي تتموج هذه المرة . ففي السلم الأدق من المجهري ، يوجد عوالم هندسية هائلة التشوه والانفتال ، تظهر وتزول ، تتشكل وتتلاشى ، في نشاط لا يتوقف . وثمة اعتقاد شائع ، في هذا السلّم المتقزم جداً والذي يبلغ 10^{-33} من السنتيمتر

شكل ٤ ـ ١٨ . تفتت المكان ـ الزمان . يقول ويلر بأن المفعولات الكمومية ، في هذا المجال الأدق من المجهري ، عنيفة لدرجة أنها تثقّب المكان ـ الزمان فتجعل له بنية اسفنجية ذات أخاديد وقناطر دودية . وهذا النشاط العنيف تمر به الجسيمات الأدق من الذرية مرور الكرام ، لأن حجمها ، بالنسبة لهذه الثقوب الدودية ، كحجم الشمس بالنسبة للذرة .



(أي أصغر من قطر نواة الذرة بمئة مليار مليار مرة) ، بأن تموجات المكان ـ الزمان يُتوقع لها أن تبلغ من العظم درجة تستطيع أن تُحدث تغييرات توبولوجية . وتظهر ، لمن يمكن أن يراها ، عوالم فضائية ذات «أنفاق وقناطر دودية» لاتلبث أن تزول ، مما يعطي المكان ـ الزمان في هذا السلّم صورة بحر يرغي ويزبد . وفي مثل هذا النوء البحري العاصف يقف الخيال والحدس عاجزين إزاء هذا الارتصاص الثقالي ومتفرداته . وهكذا قد لاتقود هذه الصورة الكمومية إلى شيء . وبدون نظرية كاملة بهذا الخصوص لا يمكن أن يحدث إجماع لحمل هذه الصورة على محمل الجد . وكل ما يمكن قوله ، حتى الآن وفي هذا الشأن ، هو أن مفهوم المكان ـ الزمان المستمر لا يمكن على الأرجح تعميمه على مثل هذه المناطق اللامتناهية الصغر .

إن من أكبر أنصار هذه «الهندسة الحركية» الكمومية الفيزيائي الأمريكي ويلر J.Wheeler . وقد أوضح أن طاقة كل هذه التموجات عظيمة لدرجة أن شأن الجسيم العنصري الموجود فيها لايزيد عن شأن غيمة في هواء الجو . فنحن ، بالرغم من رؤية الغيمة ـ كما من رؤية الجسيم ـ لا نحس لها بأثر يذكر في النشاط الجوي الغامر . وصورة المادة والمكان ـ الزمان هذه تبدو بعيدة ، بعد الأرض عن السماء ، عن الصورة التي حاول لا يبنتز Leibniz وماخ أن يرسماها للمكان والزمان بمعزل عن المادة . فنظرية الكم الحديثة تجعل المكان ـ الزمان محور القضية وتجعل المادة مجرد اضطراب في بنية غامرة . ومن الجنون أن نظن أن القضية قد انتهت عند هذا الحد . ومما لاريب فيه أن نظرية ستظهر في المستقبل تعيد بناء المكان ـ الزمان ونظرية الكم معاً على أسس أمتن بكثير ، وعندئذ سيبزغ مفهوم جديد كلياً للمكان ـ الزمان . وعلى القارىء ، في الوقت الحاضر ، أن يكتفي بالنظر الى النسبية ونظرية الكم على أنهما بارق من الحقيقة الصادقة يكشف عن وجهين من الوجوه العديدة للقضية الساحرة .

٤ ـ ٦ الموقف الشائع من النظرية العامة

ومن منطلق أن معظم هذا الفصل يعتمد على نظرية النسبية العامة نجد من الخير أن نختمه ببضع كلمات عن مكانتها كنظرية عا مية . فقد استقبلها الفيزيائيون عموماً ومنذ

زمن طويل على أنها خير توصيف للمكان ـ الزمان في حقل التثاقل . وهذا القبول مسوَّغ ، في معظمه ، بما تتمتع به هذه النظرية من جمال حقيقي وأناقه ممتعة في توصيف الطبيعة . لكن هذه الأناقة لا تمتد مع الأسف الى معظم تطبيقات النظرية ، حيث تعترضها صعوبات رياضية فنية لا أمل حتى اليوم في تذليلها . إن بعض هذه الصعوبات ناشىء عن أن التثاقل شكل من أشكال الطاقة وهو بالتالي نسيج نفسه ، أو قل بموجز العبارة ، أن التثاقل نفسه يتثاقل . وهذا مايتجلى في التشكيل الرياضي للنظرية على صورة معادلات لا خطية . وهذا يعني أن مجموع المفعولات التثاقلية ليس مفعول مجموعها ، أي أن المرء لايستطيع ، من مجموعة حلول معروفة في جمل بسيطة ، أن يحصل بضمها معاً على حل للجملة الوحيدة المركبة من تلك الجمل البسيطة. وبسبب هذه المصاعب التقنية مايزال المضمون الحقيقي لهذه النظرية قيد التحري ، حتى بعد سبعين عاماً من اكتشافها .

إن الشواهد التجريبية على هذه النظرية العامة ماتزال قليلة جداً إذا ماقيست بما هو الحال في شأن النظرية الخاصة . ففيما عدا مفعولها على فلك عطارد وانزياح الطيف الضوئي نحو الأحمر ، أُجرى قياس عملي دقيق لانحناء الأشعة الضوئية في الفضاء المنحني قرب الشمس . لقد كان الاتفاق جيداً ، لكن ثمة عدداً من الأمور التي تعقد هذه التجربة . فهناك عدد كبير من نظريات التثاقل المنافسة ، وبعضها نظريات مترية على شاكلة نظرية آينشتاين وتعتمد على تفسير التثاقل هندسياً ، وبعضها غير ذلك ، بيد أن من المتفق عليه أن كل هذه النظريات المنافسة تقريباً تدحضها النتائج على قلتها ، بينما لا تتمتع أي منها بالجاذبية الجمالية لنظرية آينشتاين .

وفي المجال الكمومي شواهد ملحوظة جداً لصالح نسبية عامة تقوم مقام حالة حدية غير كمومية . وهناك ، في مجال المبادىء الأساسية لنظرية الحقول الكمومية ، اعتبارات تكاد تقود حصراً الى مبدأ التكافؤ والى خواص التحويل الهندسية وعدم خطية التثاقل . على أن الاخفاق المتكرر في تحقيق زواج ناجح بين نظرية الكم والنسبية العامة قد أدى الى تراكم الآراء في أن نظرية آينشتاين خاطئة في مجال الكم . ولاشيء ، حتى كتابة هذه السطور ، يدل على أن هذه المعضلة ستجد في القريب حلاً ، سواء من خلال تعديل النظرية العامة لتنسجم بنجاح مع نظرية الكم أو من ظهور بنية جديدة أعمق من الكم ومن المكان ـ الزمان .

٥ علم الكون الحديث

٥ ـ ١ طراز بناء العالم الكوني

إن تحليل الفضاء والزمن لا يكون تاماً إلا إذا ناقشناه بمجمله . فالعالم هو مجمل الفضاء ، ومجمل الزمان هو تاريخ هذا العالم . فماذا يمكن أن نقول عن بنية هذا العالم الكوني وعن مولده وحياته ومماته ؟

لقد كان يُنظر بعين الدهشة الى قدرة العلم على أن يسهم ولو قليلاً في أمور تخص خلق الكائنات ومصيرها . فقد اعتبرت هذه الأمور ، في معظمها ، من اختصاص الدين أو الفلسفة ، وهذا ما كان قائماً بالفعل خلال القسم الأعظم من تاريخ البشرية . أما العلميون فكانوا يُسألون عما يعتقدونه حول هذه المواضيع . إن هذا السؤال يدل على الجهل في تقدير التقدم الكبير الذي أحرزه العلم مؤخراً في فهم طبيعة وتطور هذا الكون بمجمله . فلم يعد العلميون بحاجة لأن يتساءلوا عما يعتقدونه حول خلق الكون متى بدأ ، ولا عن الشكل الذي اتخذه (بل لهم معتقدات راسخة) ، لكن المسألة تتلخص عندهم في استخدام الأدوات الحديثة كي يروا ماذا يشبه هذا الكون وكيف تطور نحو الشكل الذي هو فيه . وهم لا يعالجون مثل هذه الأمور على أساس من الإيمان المسبق ، بل على أنها قضايا تحتاج الى بيّنة والى نظرية ، على شاكلة مايفعلون في فروع العلم الأخرى . صحيح أن فهم هذه القضايا الكونية هو في معظمه بدائي واختباري في الوقت الحاضر ، وأن من المؤكد أن تغيرات كبيرة ستطرأ في المستقبل على صورة الكون المقبولة اليوم عموماً . بيد أن من المهم أن نعلم أننا نتعامل هنا مع العلم ومع القيم العلمية ، وعلى هذا ، وفي حين أن المعتقدات الدينية والميول الفلسفية يمكن أن تسهم كثيراً في توليد الأفكار الشخصية عن هذا العالم ، فإن الأمور التي سنناقشها في هذا الكتاب لا تتناول إلا الوقائع الملموسة المرصودة والمجادلات التي تحتدم بخصوص تفسيرها النظري .

من الخير أن نبدأ بعرض عام لبنية العالم كما نعرفها اليوم . وربما كان خلوه أبرز سماته ، فهو يكاد أن يكون برمته فضاء خالياً . وهذا الكلام له بالطبع معنى محدد .

فبالاستناد الى الاعتبارات الكمومية التي ذكرناها في نهاية الفصل الرابع ، يحوي هذا العالم كميات من الاشعاع ومن الذرات الشاردة النادرة . لكننا ، وبالمعنى الشائع ، يجب أن نتصور أن محتويات هذا الكون المادية مفصولة بعضاً عن بعض بمسافات فضاء شاسعة .

إن معظم المادة المنيرة قد اتخذ شكل نجوم . وكل النجوم تشبه شمسنا ، رغم اختلافها البيِّن في الحجم واللون والتركيب والتطور . والنجوم تؤلف معاً ، ومع بعض الغازات والغبار (وأجسام أخرى سواها) ، تجمعات هائلة العدد والحجم تسمى المجرّات ، ونموذجها المجرة التي نحن منها وتحتوي على مايقارب مئة مليار نجم (وهو عدد قريب من عدد خلايا المخ البشري) ، ويبلغ اتساعها قرابة ٥٠ ٠٠٠ سنة ضوئية .

إن المجرة في المقياس البشري هائلة لدرجة لانتصورها . لكنها في المقياس الكوني هباءة مهملة . والمجرات منثورة في هذا الكون بصورة أقرب الى العشوائية اذا استثنينا أنها تؤلف هي أيضاً تجمعات صغيرة . إن هذه «القطعان» المجرّية هي «ذرات» هذا الكون . والحديث عن سلوك هذا العالم يتناول أشياء بمثل هذه الضخامة وأكثر . فنشاط المجرة الواحدة الداخلي ، على أهميته الكبيرة ، غير ذي شأن عظيم في علم الكونيات .

وقد يجد القارىء فائدة في ربط هذا التسلل البنوي بما يشاهده عندما ينظر في السماء في ليلة حالكة السواد . فأشد الأجرام نوراً مستمراً هي ، باستثناء الشمس والقمر ، الكواكب المجاورة . وهي تؤلف مع الأرض زمرة من تسعة أفراد تدور حول الشمس (التي يبلغ نصف قطرها ٧٠٠ ٠٠٠ كيلو متر ـ أي مئة مرة من نصف قطر الأرض) على مسافات تصل الى بضعة مليارات من الكيلو مترات . وهذه الزمرة الكوكبية مع شمسها تسمى المنظومة الشمسية . ورغم شبه هذه الكواكب بالنجوم ، إلا أنها في الحق صغيرة جداً ومعتمة إذا قيست بالنجوم . فهي لا ترى إلا بفضل نور الشمس المنعكس عنها ، وتبدو لنا لامعة بسبب قربها منا . لو استطعنا أن ننقل أعظم تيليسكوباتنا الى أقرب النجوم إلينا لعجزنا ، ولو بواسطتها ، عن رؤية هذه الهباءات ، صويحبات الشمس .

لكن النجوم الحقة شموس عظيمة التوهج ، وهي تقع منا على مسافات هائلة لدرجة أنها ، رغم نورها الأشد بملايين المرات من نور الكواكب ، تبدو أخفت منها نوراً . ولا غرابة إذا كانت هذه النجوم بمعظمها ذات كواكب تدور حولها ، على شاكلة منظومتنا

الشمسية . وقد ذكرنا ، في الفصل الرابع ، نتفاً عن بنية النجوم وتطورها .

إن النجـوم العديدة التي نراها بالعين المجردة في سماء ليالينا ليست سوى جاراتنا الأقـرب إلينا في مجرتنا . والقسـم الأعظم من هذه المجرة هو ذلك الذي يُرى على شكل عصـابـة ضبابية خافتة النور ممتدة عبر سماء الليل ، ومعروفة باسـم درب التبّانة(*) . أما التيليسكوبات الشائعة فتظهر أن درب التبانة يضم ألوفاً مؤلفة من النجوم المنثورة . ومركز مجرتنا يقع في اتجاه برج السماك الرامح ووراءه .

والمجرات الأخرى لا ترى عملياً بالعين المجردة ، لكن بعضاً منها يمكن أن يرى من خلال منـظار عادي كبير التجسيم . ومجرة المرأة المسلسلة (أندروميدا) وهي كبيرة وقريبة نسبياً (على مسافة مليون ونصف من السينن الضوئية فقط !) يمكن أن يراها انسان ذو بصر حديد على شكل غيمة متطاولة زغباء في برج المرأة المسلسلة . والمراصد الحديثة قادرة على كشف مئات الملايين من المجرات الأخرى . وبنيتها تتفاوت كثيراً لكن معظمها ذات شكل جميل مميز يشبه قرصاً واسعاً منتفخاً في وسطه وذا أذرع ملتفة حول محيطه ، فكأنه دولاب الألعاب النارية . فمجرة المرأة المسلسلة ومجرتنا الخاصة كلتاهما من هذا الشكل اللولبي . ومنظومتنا تقع على مسافة ثلثي نصف القطر من مركز مجرتنا تقريباً ، في أحد الأذرع اللولبية .

هذا ويجب أن نتذكر دوماً أننا عندما ننظر في هذا الكون لا نرى المجرات كما هي الآن . بل كما كانت في ذلك الماضي السحيق . ذلك لأن الضوء الواصل الينا منها قد قطع ملايين ملايين الكيلو مرات واستغرق في سفره هذا ملايين السنين . فالضوء الآتي من مجرة المرأة المسلسلة القريبة يستغرق مليونا ونصف المليون من السنين ليصل الينا . والمراصد العظيمة تكشف مجرات أنأى بكثير ، فنزاها كما كانت قبل مليارات من السنين .

وبالاضافة الى المجرات التي لاترى الا عبر المرقابات الضخمة يوجد بلا شك أجرام أخرى في الفضاءات العريضة المظلمة بين المجرات . كم عددها وماذا يمكن أن تكون ظروفهـا الفيزيائية ؟ لا جواب عن ذلك سوى التخمينات . هذا ناهيك عن إشعاعات

(*) هذا هو اسمها العربي الشائع ، أما الأوربيون فيسمونها الطريق الحليبية . «المترجم» .

وجسيمات من كل الأجناس تجوب هذا الفضاء برمته . ففيها الاشعاعات الكهرطيسية والثقالية والنترينوات وسواها من الأشعة الكونية (التي تتألف من شتى أنواع الجسيمات الأولية) .

وبعد هذا الحديث الموجز عن توزع المادة في هذا الكون لابد من بضع كلمات نشرح فيها ممَّ تتألف هذه المادة . إن كل المادة تتألف من ذرات . ويوجد على الأرض ٩٢ نوعاً من الذرات المتشكلة طبيعياً ، ويوجد أيضاً أنواع أخرى نشكلها اصطناعياً . والمادة المؤلفة كلها من نوع ذري واحد تسمى عنصراً . ويمكن أن تتحد ذرات من أنواع مختلفة أو من نوع واحد لتشكل مايسمى جزيئاً ، وقواعد هذا الاتحاد من اختصاص علم الكيمياء . فالمادة بشتى أشكالها وأجناسها ، من الماس الى الهواء ومن البشر الى النجوم ، مصنوعة كلها من اتحادات مختلفة من هذه العناصر الأساسية نفسها . وأبسط العناصر هو الهدروجين ، وذرته تتألف من جسمين فقط : الكترون واحد وبروتون واحد . ويليه الهليوم ، وتتألف ذرته من ستة جسيمات من بروتونين ونترونين ملتصقة كلها معاً لتشكل نواة في مركز الذرة ، ومن الكترونين يدوران حول النواة وتمسك بهما قوة جذب كهربائية . أما أثقل العناصر التي تشكلت طبيعياً فهو الأورانيوم ، وتضم نواته ٩٢ بروتوناً مع حوالي ١٤٠ نتروناً ، ويدور حولها ٩٢ الكتروناً .

إن الفروق الرئيسية فيما بين الذرات تعود الى اختلاف عدد البروتونات في النواة . وكل الذرات الممكنة ، من ذات البروتون الواحد الى ذات الـ ٩٢ بروتوناً ، معروفة لدينا اليوم ، لكن بعضها ، كالحديد مثلاً ، نادر جداً . أما العناصر التي يزيد عدد بروتوناتها عن ٩٢ ، والتي استُحضرت اصطناعياً (كالنبتونيوم والبلوتونيوم) ، فهي قلقة (مشعّة) ومصيرها التفكك بشيء من السهولة ، ولذا فهي غير موجودة في الطبيعة على الأرض .

تدل دراسات طيف إشعاع الأجرام السماوية على وجود هذه العناصر نفسها . فمن المعروف أن الهليوم قد اكتشف في الشمس (كما يدل اسمه)(*) قبل اكتشافه على الأرض . على أن الوفرات النسبية للعناصر على الأرض ليست نموذجاً لوفراتها في العالم الأوسع .

(*) إن كلمة هليوم مشتقة من كلمة هليوس اليونانية التي تعني الشمس . «المترجم» .

فالتقـديرات تشير الى أن ٩٠٪ من ذرات الكون كله تتألف من الهدروجين ، أما الباقي فمعـظمـه من الهليوم . لكن العنـاصر الأثقـل ، التي نعلم مبلغ وفـرتها على الأرض ، لاتشكل سوى جزء طفيف جداً من المجموع . وهذا دليل قوي على أن شيئاً ما قد فعل فعله الانتقائي أثناء تشكل الأرض .

إن الهبوط السريع في وفرة العناصر ذات الأوزان المتزايدة يوحي بقوة بأن الكون قد ابتـدأ بدون ذرات ثقيلة وبأن آلية تركيبية قد فعلت فعلها فصنعت العناصر الثقلية من العناصر الأخف الأبسط كالهدروجين . أما أين يتركز فعل هذه الآلية في أثناء تصنيع هذه العناصر فموضوع مطروح للمناقشة في دروس مختصة . وهو لاريب ضالع أكثر من سواه في أسباب اللاتناظر الزمني الذي يعم الكون . أما من أين جاء الهدروجين في بدء البدء فموضوع بحث آخر سنعرضه في الفقرة ٦ ـ ١ .

لاريب أن أكثـر سمات هذا الكون دلالة هي درجة انتظامه العالية . فهو منتظم حقـاً بمعنيين مختلفين . أولهما في البنى التفصيلية للمجرات والنجوم النائية وفي القوانين الفيزيائية السائدة فيها والمقادير التي تتجلى بصورة طبيعية (كشحنة الالكترون مثلاً) ، كل هذه الأشياء تظهر مطابقة تماماً لمثيلاتها في المناطق المجاورة لنا من هذا العالم وعلى الأرض أيضـاً . فالمجرات التي تبعد عنا بمئات الملايين من السنين الضوئية لاتبدي ، من هذه الزاوية ، أي اختلاف مع مجرتنا . فطيوف ذراتها وبالتالي فيزياؤها وكيمياؤها ، مطابقة لما هو قائم على الأرض . وهـذا الـواقـع يعطينـا ثقـة عظيمة في تطبيق القوانين الفيزيائية المكتشفة في مخابرنا على الكون بأسره .

والمظهر الثاني للانتظام الكوني يخص توزع المادة . فمن الوصف الذي أتينا على عرضـه يتضـح بجـلاء أن هذا التـوزع أجّمي متناثر . فالمادة ملمومة على شكل نجوم ، والنجوم منظومة في تجمعات من حجم المجرات ، والمجرات منظومة كلها في زمر عديدة . ويعتقد نفر من علماء الكون أن هذا التسلسل مستمر على هذا النحو من التوالي الى ماشاء الله ، وأن كل تجمع متقدم تفصله عن أمثاله سباسب سحيقة من الفضاء الخالي . على أن المـظنـون عمـومـاً ، وبـالاعتـماد على أمـارات رصدية معقولة الوضوح ، هو أن هذا التسلسـل يقف عنـد حد التجمعـات المجـرّية ، وأن توزع المـادة ، بالتالي وفي السلّم

العظيم ، سويّ جداً في هذا العالم . وهذا التوزع متجانس (لايتغير من منطقة لأخرى) ومتناحٍ (لايختلف باختلاف المنحى) . وهذا مُرضٍ ، لا من الناحية الجمالية فحسب ، بل أيضاً من ناحية أن بنية عالمنا هذا في السلم العظيم بسيطة جداً وأنها ملائمة جداً من الناحية النظرية لأنها تتيح صنع نماذج رياضية لهذا العالم على أقل درجة من التعقيد التقني . وهذه البنية تتفق ، فوق ذلك ، مع الفكرة الكوبرنيقية الحديثة التي تنفي عن الأرض ميزة أن تكون مركز العالم . فقبل كوبرنيق كان الفكر الأوربي يضع الأرض في مركز العالم ويجعل كل الأجرام السماوية دائرة حولها . وكان اكتشاف كوبرنيق لدوران الأرض حول الشمس صدمة قاصمة أبدية لهذا الوهم لم تستعد البشرية بعدها كامل وعيها حتى اليوم . أما في هذه الأيام فمن قبيل الكفر أن يرى المرء في المنطقة المجاورة لنا من العالم أكثر من نموذج نوعي للعالم كله . كما أن الظروف الفيزيائية في جوارنا ليست ظروفاً خاصة ، بل إنها تمثيل صادق لشتى مناطق هذا الكون . فأرضنا وشمسنا ومجرتنا يمكن أن تكون ذات أهمية عظيمة للجنس البشري ، لكنها بمجملها ، وفي المخطط الكوني العام ، ذات شأن لايزيد ولا يقل عن شئون سواها .

إن الافتراض بأن العالم الكوني منتظم في السلم الواسع العظيم مقبول اليوم لدى أغلبية علماء الكون (لا كلهم) ، وهو معروف باسم المبدأ الكوني . وبالاندفاع مع هذا المبدأ الى مداه البعيد نجد أن الفلسفة الكوبرنيقية الحديثة لاتقتضي فقط أن تكون المنطقة الكونية المجاورة لنا نموذجاً لكل أجزاء المكان ، بل وأن يكون عصرنا الحاضر أيضاً نموذجاً لكل أجزاء الزمان . وهذا يتضمن بأن أي مكان وأي زمان نتحراهما سيبدوان مماثلين تقريباً لما هما عليه .

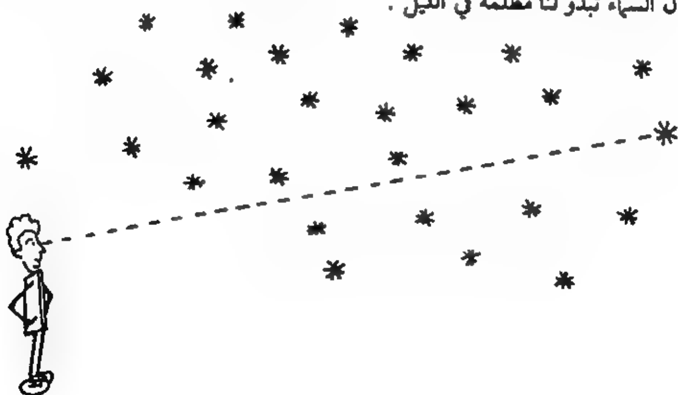
إن الصورة التي رسمناها لهذا الكون في هذه السطور كانت مقبولة عموماً لدى الفلكيين منذ قرن مضى . فقد كانت النجوم الملتهبة تُعتبر دوماً مبعثرة بشكل واحد في الفضاء اللا متناهي كله .

إن هذا النموذج المرهف ، والعقيم نوعاً ما ، يعاني مع ذلك عدداً من العيوب الخطيرة . أحدها ، وهو المعروف باسم مفارقة أولبرس (باسم الفلكي الألماني H.Olbers ، ١٧٥٨ ـ ١٨٤٠) ، يرتكز على التعارض بين فكرة كون لانهائي ولامتغير وبين ظلام

السماء في الليل . فقد يبدو من السخف أن نتساءل عن سبب ظلام السماء في الليل ، غير أن ظروف هذا النموذج الكوني تخلق لنا معضلة حقيقية . وأحسن ماتقدمه الفيزياء الحديثة بهذا الصدد تعبر عنه بلغة الترموديناميك . فالسماء المظلمة سماء باردة ، وهذا مايجعلنا نستنتج أن الكون بارد جداً وسطياً (الواقع أن درجة حرارته الوسطية لاتزيد عن ثلاث درجات فوق الصفر المطلق) . لكن النجوم ، كالشمس ، حارة جداً ؛ فسطحها يبلغ آلاف الدرجات ، في حين أن داخلها يبلغ مئات الملايين . فلماذا إذن ، وبكل بساطة ، لم تسخُن النجوم هذا الكون حتى الآن ؟ وكيف يمكن لعالم غير متغير أن يظل دوماً في حالة لا توازن ترموديناميي ؟ فإذا كانت الاشعاعات ماتزال تنسكب من النجوم منذ الأزل ، فإن الكون لابد أن يكون حاراً جداً ، ولابد أن تكون سماء الليل غاصة

شكل ٥ ـ ١ . مفارقة أو لبرس . إذا كان وجود النجوم مستمراً الى غير نهاية وبكثافة منتظمة على طول أي خط نظر ، فإن أي خط نظر لابد أن يصادف ، عاجلاً أو آجلاً ومهما كان منحاه ، نجماً من النجوم . وعلى هذا فلا يمكن أن يوجد ظلام في أية منطقة من السماء .

لاحظ أن النجم يخفت نوره ، كلما ازداد بعده عنا ، بنسبة تصاغر سطحه . فكل نجم ينير إذن الرقعة الفضائية التي يحتلها باللمعان نفسه . وبما أنه يوجد ، على مسافة بعيدة ، نجوم أكثر مما يوجد في الجوار ، فإن الكسر السماوي الكلي الذي تحتله النجوم الواقعة على مسافة معينة لايتعلق إذن بهذه المسافة . وعلى هذا لو كنا قادرين على رؤية النجوم مهما كانت نائية عنا فإن السماء كانت ستبدو لنا مغطاة كلياً بالنجوم . ولما كنا لانملك هذه القدرة فإن السماء تبدو لنا مظلمة في الليل .



باشعاع يرفع حرارتها الى آلاف الدرجات . ولو كان الأمر كذلك لكنا ، بكل ماعندنا ، قد تبخرنا بأسرع من لمح البصر .

إن علم الترموديناميك لم يصل الى هذه الدرجة من النضج إلا منذ قرن من الزمان . وقد عبر أولبرس عن مفارقته بلغة علم الضوء ومن السهل أن نتتبع محاكمته : إذا كان العالم الكوني غير محدود الحجم وغير متغير في الزمان ، وكانت كثافة النجوم الخالدة النور منتظمة ، فإن المرء لابد أن يرى نجماً في أي اتجاه نظر ، أي أن كل خط نظر لابد أن يصادف ، عاجلاً أو آجلاً ، نجماً على امتداده . وعلى ذلك فلا مكان للظلام في أي منطقة من السماء ، فكل خط نظر سيكون لامعاً بشدة أحد النجوم .

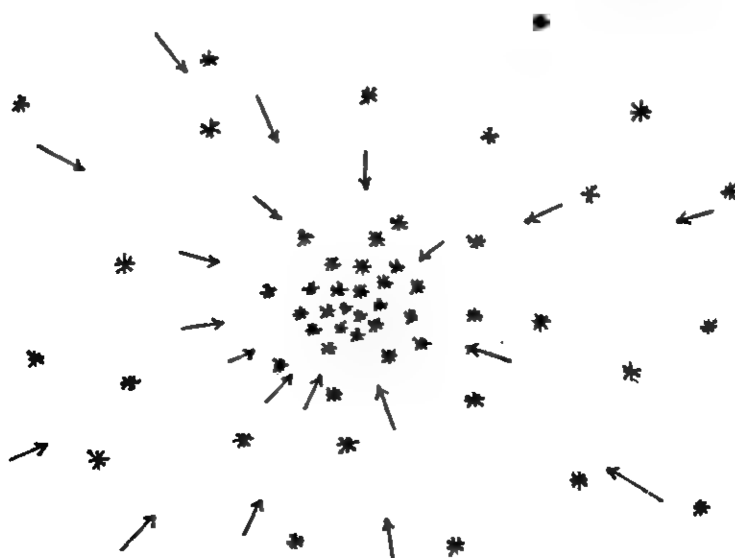
ليس من الصعب أن نجد بالفكر عدداً من الحلول المناسبة لمفارقة أولبرس . فالنجوم مثلاً ، وبعد كل شيء ، لايستمر وجودها على طول خط النظر الى اللا نهاية ، بل هي مجمعة كلها في قطرة عظيمة سابحة في فضاء لا نهائي أوسع وأشد خلاء ، مما يتيح لمعظم الاشعاع أن يذهب بعيداً الى ماوراء ذلك من خلاء ، ودون عودة . وهذا النموذج لم يخطر بالطبع على بال كوبرنيق ، لأن النجوم القريبة من سطح القطرة ذات موقع أقرب الى الخاص منه الى النوعي (إنها تطل على الفضاء الخالي في اتجاه واحد) . ونحن لا نملك سوى أن نقبل أن وجودنا قريبين من المركز ليس أكثر من صدفة بحتة . لكن اعتراضاً آخر أكثر خطورة عبر عنه نيوتن حين كتب أن قوة التثاقل تجعل النجوم تتجاذب ، فاذا كان لقطرة النجوم حافة فلابد أن يكون لها مركز ولابد من أن تتهافت نحوه . ولما كان هذا ، في رأي نيوتن ، لم يحدث فلا مناص من القبول بأن النجوم منثورة حتى اللا نهاية .

ويوجد لمفارقة أولبرس حل مختلف كلياً يأتي من اقتراح قدمه بولتزمان الذي قال بأن اللاتوازن الترموديناميي للعالم ناجم بالصدفة عن تفاوت عظيم (دورة بوانكاريه ، انظر الفقرة ٣ ـ ٣) مما يحدث مرة كل فترة ، $١٠^{١٠^{٨٠}}$ عاماً أو نحوها ! وقد يحدث بين حين وآخر ، والعالم متروك لشأنه على مدى هذا الزمن الطويل ، أن تتدفق تلقائياً كل حرارته في النجوم حتى تبلغ ملايين الدرجات . والذي نشهده اليوم هو التفاوت الذي يخرب

نفسه ويعود بالنجوم الى حالة التوازن مع الفضاء . وطبقاً لهذا الاقتراح فإن السماء مظلمة في الليل لأن الحرارة قد تدفقت الى داخل النجوم متناسقة . أما سبب أن الجنس البشري هو الذي اختير ليكون شاهداً لهذا الحادث النادر لدرجة لا تُصدق فهو ، وبالضبط ، أن الكائنات الحية ، بما فيها علماء الكون ، لا تتشكل إلا من اللاتوازن (كوجود ضوء الشمس) الذي حدث فأتاح لها البقاء .

الواقع أننا لانستطيع أن نحمل فكرة بولتزمان على محمل الجد . فليس ثمة سبب يجعل كل مناطق العالم بحاجة الى أن تتفاوت معاً لتولد الحياة على الأرض . ولو كان

شكل ٥ ـ ٢ . كارثة كونية ! اذا كان الكون محدوداً فلابد من وجود مركز له ولابد له من أن يتهافت نحوه ، مجذوباً بثقالة النجوم نحو الداخل . وفي عام ١٦٩٢ كتب نيوتن أن مثل هذا الكون لابد أن «يسقط هاوياً نحو وسط الفضاء كله ، وهناك تتشكل كتلة كروية واحدة عظيمة . أما إذا كانت المادة موزعة بالعدل على فضاء لا نهائي . . . فإن بعضها سيندمج في كتلة واحدة وبعض آخر في كتلة أخرى . . . وبهذه الطريقة يمكن أن تتشكل الشمس والنجوم الثابتة» .



اللاتوازن قد حدث على هذا الشكل فمن غير المعقول أن نجد نجماً لماعاً في منطقة نائيه نسدد إليها المرقاب . إن هذا التفاوت الكوني أقل احتمالاً بكثير من التفاوت المحلي .

لقد كان بامكان أي من فلكيي القرن الماضي أن يتكهن بالحل الصحيح لمفارقة أولبرس . لكن الواقع أننا اضطررنا الى الانتظار حتى إنشاء المرقاب الكبير في مرصد جبل ويلسون في الولايات المتحدة الامريكية وحتى حدوث الاكتشاف الرائع الذي يضاهي في معناه اكتشاف كوبرنيق .

٥ ـ ٢ العالم المتوسع

في عام ١٩٢٩ أعلن الفلكي الامريكي هوبل E.Hubble (١٨٨٩ ـ ١٩٥٢) بعض نتائج القياسات التي أجراها على الضوء الآتي من المجرات النائية . فلدى فحص الطيف التواتري(*) لهذا الضوء اكتشف أن الخيوط الطيفية منزاحة ، كلها وبشكل منهجي ، نحو اللون الأحمر (وهو أقل الألوان تواتراً في الطيف الضوئي المرئي) . وقد وجد أن مقدار هذا الانزياح نحو الأحمر يزداد متناسباً مع بُعد المجرة عنا . وقد شرحنا في الفصل الثاني كيف يحدث هذا الانـزياح التواتري كنتيجة لابتعادمنبع هذا الضوء ، أي مفعول دوبلر . إن الانزياح نحو الأحمر دليل واضح على أن المجرات تتحرك مبتعدة عنا باسلوب منهجي : كلما كانت بعيدة كانت حركة ابتعادها أسرع . والنتيجة التي لا مناص من قبولها هي : إن العالم في حالة توسع . إن هذا الاكتشاف اللا متوقع بتاتاً قلب الأمور في علم الكون رأسـاً على عقب . فالعالم المتوسع عالم متغير ، له تاريخ حياة وربما حتى ميلاد وموت . والمفارقات التي على شاكلة مفارقة أولبرس قد ذهبت أدراج الرياح ، إذ مامن سبب يجعلنا نتوقع من كون منطور أن يكون متوازناً ترموديناميأ بحال من الأحوال .

إن هذا التـوسع يُبرز ، فوق ذلـك ، إمكانية مثيرة جديدة تقود الى مبدأ أساسي يواكبهـا : اذا كان العالم يتحرك ، فهل ثمة قانون يحكم حركته ، كقوانين نيوتن مثلاً ؟ وهل ثمة معنى لمعالجة العالم ككل على شاكلة جملة ميكانيكية ؟

إن علم الكون الحديث مبني على مسلَّمة تقول بأن جواب هذه الأسئلة هو نعم .

(*) إن التواتر هو عدد الهزات في واحدة الزمن (في الثانية مثلاً) ، ويـسميه الاذاعيون التردد . «المترجم» .

إن الحركة الاجمالية للكون مفروض فيها أن تطيع القوانين نفسها التي تحكم حركة مفردات أجزائها .

والخطوة التالية تهدف الى معرفة القوةالتي تنظم الحركة الكونية . ليس لدينا من ذوات الفعل المديد لدرجة كافية سوى القوى الكهرطيسية والقوى الثقالية لتصل الى تلك التخوم النائية . ونعلم ، في الأجرام الواسعة ، أن الثقالة أعظم بكثير وزناً من الكهرطيسية ، حتى في سلّم المنظومة الشمسية . وعلى هذا فإن النظرية المرجوة في حركة العالم يجب أن تكون نظرية في التثاقل . وعندما أعلن هوبل اكتشافه كانت نظرية النسبية العامة قد أصبحت جاهزة ومقبولة كأفضل مانملك في توصيف الحركة في حقل الثقالة . وعلى هذا راح الفيزيائيون يدرسون التحريك الكوني بصنع نماذج للعالم رياضية نسبوية .

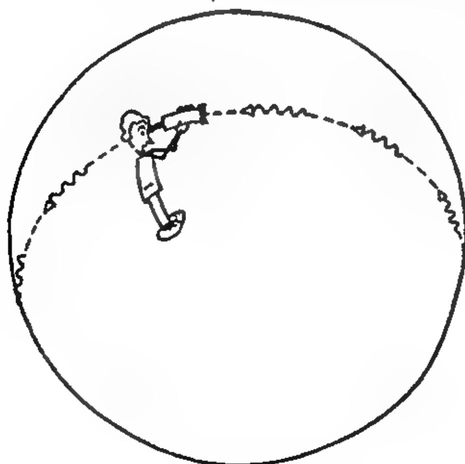
الواقع أن تطبيق النسبية العامة على العالم الكوني كان آينشتاين قد أجراه بنفسه قبل اكتشاف هوبل . ومن الطريف أن آينشتاين قد ارتعب حين وجد أن نظريته تقود الى عوالم إما متوسعة أو متقلصة . ولكي ينسجم مع الاعتقاد السائد في ذلك الوقت بأن العالم غير متغير حاول أن يصنع نموذجاً لعالم سكوني لايتساقط على نفسه بفعل ثقالته الخاصة ، أو يحاول التوسع للتخلص منها . وقد ذهب في هذا السبيل بعيداً لدرجة أنه عدّل في نظريته كي يلبي هذا المطلب ، فاضاف قوة تنافر كونية لتوازن تجاذب النجوم الثقالي .

إن نموذج آينشتاين يختلف عن النموذج السكوني القديم ، المعتمد على نظرية نيوتن في التثاقل ، في ناحية جديدة وساحرة ، وهي أن نموذج عالم آينشتاين منته ، ولكنه مازال واحداً في كل مكان . أي أنه عالم محدود الحجم ولكنه عديم الحافة ! وإن وجود مثل هذه الهولة لاشك مستحيل في نموذج المكان والزمان النيوتني . لكن انحناء الفضاء في النسبية يتقبل بالفعل هذه الامكانية . وقد عرضنا في الفصل الرابع نموذجاً لهذا الانحناء يعتمد على التشبيه مع سطح الكرة ذي البعدين . فالسطح الكروي منته لكنه لا يملك حدوداً ـ انه فضاء منته غير محدود . فالفضاء ذو الأبعاد الثلاثة له ، في نموذج آينشتاين ، توبولوجية تضاهي توبولوجية السطح الكروي في الفضاء ذي البعدين . فعالم آينشتاين له ، بهذا المعنى ، حجم فضائي منته تتوزع فيه المجرات بالتساوي ، وهذا

يتفق مع المبدأ الكوني ، وليس له حافة ولا خط حدود في أي مكان . وبدلاً من أن يستمر امتداده نحو الخارج ، ينغلق هذا الفضاء على نفسه كما يفعل السطح الكروي وهو «يصل في تكوره أوله بآخره» . وهذا يعني أن القاطن في مثل هذا العالم يمكن أن يرى الشعاع الضوئي ، الذي كان قد اندفع أمامه في خط مستقيم ، عائداً إليه من الجهة المعاكسة بعد أن يكون قد دار حول العالم . كما أن المرء يستطيع أن يتصور رحلة فضائية مغلقة كونية ، على شاكلة رحله ماجيلان .

إن فكـرة عالم مغلق متنه وغير محدود كانت بالتأكيد فكرة جديدة غريبة من أفكار آينشتاين . ويجد أغلب الناس بعض الصعوبة في تصور مثل هذا الشيء ويطرحون السؤال التالي : ماهو «الشيء الخارجي» عن عالم متنه ؟ إن هذا السؤال ، بالنسبة لأناس ذوي ثلاثة أبعاد ، عديم المعنى كالسؤال عن «الشيء الخارجي» بالنسبة لأناس مسطحين

شكل ٥ ـ ٣ . كيف يرى المرء نقرة عنقه . . . إن العالم ، بموجب نموذج آينشتاين محدود الحجم ، ولكن ليس له حدود . الضوء يستطيع أن يسافر الى الأمام حوله في أي اتجاه ، وسيجد نفسه عائداً الى نقطة انطلاقه من الجانب المعاكس . إن هذا يتيح للمرء (المسلح بمرقاب ذي مقدرة كافية) أن يرى نقرة عنقه . الشكل يمثل كرة . والسطح الكروي تدبير ذو بعدين يعبر عن تلك الخاصية الغريبة لعالم آينشتاين .

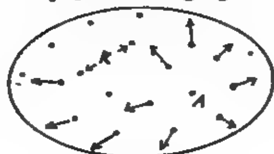


ذوي بعدين يعيشون على سطح كروي . ولا يوجد ماهو «خارج» عالم آينشتاين ، لأن وجود «داخل» و «خارج» معناه وجود خط حدودي بينهما ، وليس لهذا العالم حدود . فكل نقاطه متكافئة فيما بينها ، ليس فيها من هو أقرب الى «المركز» أو الى «الحافة» إذ لا حافة هناك ولا مركزاً .

لقد كان فريدمان A.Friedmann (عالم مناخ روسي ، ١٨٨٨ - ١٩٢٥) أول من استخدم نظرية النسبية العامة لصنع نماذج رياضية عن عالم متوسع ، ونشر نتائج أعماله عام ١٩٢٢ ، إبانِ الحاجة اليها . ومازالت هذه النماذج الاطار النظري الأساسي لمعظم المناقشة حول علم الكون الحديث . والسمة الرئيسية لنماذج فريدمان هي انطواؤها على فرضية الانتظام الفضائي . فطبقاً للمبدأ الكوني يُفترض أن التجمعات المجرّية موزعة على الفضاء بالتساوي . وقد تبنّى فريدمان توزعاً للمادة منتظماً بدقة ، ثم حل معادلات آينشتاين في النسبية العامة في ظروف هذا التوزع المادي ليجد كيف تتغير هندسة الفضاء مع الزمن . وبسبب ذلك الانتظام فإن الفرق الهندسي الوحيد الذي يمكن أن يحدث هو فرق في السلّم ، أي أن التوسع ، أو التقلص ، واحد في كل مكان .(انظر الحاشية القادمة) .

إن أقرب شيء نشبه به هذا التوسع رقعة من المطاط . وهذه الرقعة المرسومة في الشكل ٥ - ٤ تحمل نقطاً سوداء موزعة عليها بانتظام وتمثل المجرات (أو بالتدقيق مجموعة مجرات) . والرقعة تمثل الفضاء . أما التوسع فيمكن أن يتمثل بامتطاط الرقعة في كل الاتجاهات . وليكون التوسع نسيقاً يجب أن يحدث في كل الاتجاهات وفي جميع النقاط . وأثناء الامتطاط تتحرك كل نقطة مبتعدة عن كل نقطة أخرى . فمن أية نقطة معطاة نرى

شكل ٥ - ٤ توسع العالم . الرقعة المطاطية تحمل نقطاً وتمتط بالتساوي . فمن أية نقطة A تبدو النقط الأخرى متزايدة البعد أثناء الامتطاط ، وتبتعد النقط البعيدة بأسرع من القريبة . فليس ثمة مركز توسع واحد ، بل كل ماهنالك تغير في السلم لكل المسافات .



كل النقط تبتعد عنها ، مما يجعلها بذاتها تظهر كمركز للتوسع العام مادون أن يكون ذلك صحيحاً لأن كل النقط الأخرى تشاهد منظر التوسع نفسه وبالاسلوب نفسه . فليس إذن ثمة مركز للتوسع ولا مركز للعالم . ولئن كانت الرقعة المطاطية المرسومة ذات مركز ، فإن ماقلناه ينسحب على رقعة لا نهائية الاتساع ، أو على رقعة محنية على شكل سطح كروي .

هذا ويجب أن نلح على أن هذا التشبيه يُبرز أن توسع العالم هو توسع الفضاء نفسه ، ويجب أن لا نتصوره كهجرة للمجرات نحو خلاء خارجي موجود سلفاً . والهندسة المتغيرة يمكن أن نميزها بخصائص المسافة بين أي نقطتين من هذا الفضاء . وينتج من ذلك أن سرعة التباعد بين نقطتين تتناسب ببساطة مع المسافة بينهما ، تماماً كما وجد هوبل بخصوص المجرات . إن هذا الواقع وحده يعطينا بعض الثقة في أن نموذجاً

إشارة سريعة الى حلول فريدمان

إن مايصعد لابد أن ينزل ! إن هذا غير صحيح ، وقد شعر نيوتن بخطأ هذا المثل وأكدت صواريخنا الفضائية هذا الخطأ . اقذف كتلة نحو الأعلى بسرعة كبيرة كافية وسترى أنها ستتغلب على ثقالة الأرض ولاتعود .

الطاقة الكلية = الطاقة الحركية + الطاقة الكامنة = ثابت

وإذا رمزنا بـ E للطاقة الكلية الثابتة و بـ m و v لكتلة القذيفة وسرعتها و بـ M لكتلة الأرض و بـ R لبعد القذيفة عن مركز الأرض و بـ G لثابت التثاقل تأخذ هذه المعادلة الشكل التناظري الكروي المعروف :

$$\frac{1}{2}mv^2 - GM/R = E$$

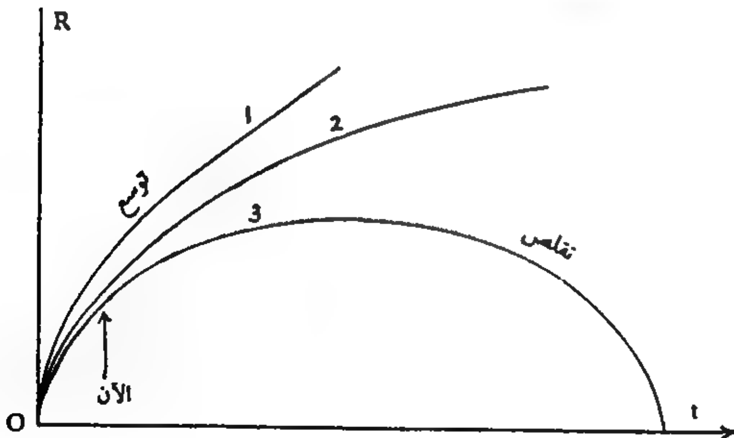
لاحظ أن v هو معدل ازدياد R الزمني ، مما يسهل حل هذه المعادلة بالنسبة لـ R كتابع للزمن t . فإذا كانت E موجبة يكون الحل من شكل المنحني 1 في الشكل ٥ ـ ٥ ، ومن شكل المنحني 3 إذا كانت R سالبة ، و 2 إذا كانت صفراً .

إن هذه الحلول السهلة مماثلة لنماذج فريدمان العالمية المحسوبة من نسبية آينشتاين العامة ، أعسر النظريات الفيزيائية رياضياً ! فالمنحني 1 يمثل عالماً (قذيفة) هارباً ذا طاقة . والمنحني 2 يمثل حالة حدية لهروب «ضيق» والمنحني 3 يمثل عالماً (القذيفة) يتساقط .

واحـداً من نماذج فريدمـان الـرياضية يمثـل بتقريب جيد سية العالم الحقيقي في السلّم الأوسع . لكن أيها الصحيح ؟ فثمة ثلاثة نماذج ممكنة ، متمثلة في الشكل ٥ ـ ٥ الذي يُظهر تابعية المسافات R لمرور الزمن t .

وقبل مناقشة هذه النماذج بالتفصيل لابد من بضع كلمات ندقق فيها بطبيعة الزمن الوارد هنا . فبناء على ماقلناه في الفصلين الثاني والرابع يتضح أن الزمن الذي يستخدمه الراصد يتوقف على حركته النسبية وعلى حقل التثاقل الذي يغمره . فكيف إذن نستطيع بناء زمن عام لوصف سلوك العالم كله وهو نفسه في حالة حركة ويغير حقله الثقالي ؟ إن الجواب مستمد هنا أيضاً من المبدأ الكوني . بما أن العالم (في المجال الواسع) يظهر متماثلاً من أي تجمع مجرّي ، ويتغير من جراء التوسع بمعدل واحد في كل مناطقه ، فإن أثر ذلك على الميقاتيات واحد في كل مكان ، شرط أن لاتكون الميقاتيات نفسها في حالة حركة سريعة بالنسبة للتجمع المجري المحلّي ، كي لا يشذ تمدد زمني نسبوي . فكل

شكل ٥ ـ ٥ . نموذج فريدمان الكوني . أثناء توسع العالم يزداد اتساع كل منطقة . والشكل يمثل مخططاً لهذا الازدياد يظهر الامكانيات الثلاث التي اكتشفها فريدمان . أنها تنطلق كلها من «لاشيء» عندما R=O . المنحنيان 1 و 2 يمثلان التوسع الى الأبد ، لكن 3 يمثل توسعاً يتوقف ثم يبدأ التقلص نحو لا شيء .



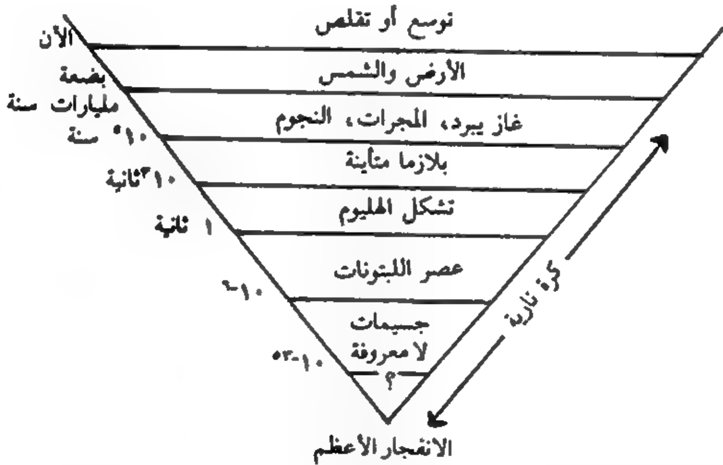
تجمع ، من التجمعات المجرية ، يحدد في منطقته مرجعاً متميزاً ـ المرجع الذي يبدو منه توسع العالم متناحياً (أي ذا معدل واحد في كل المناحي) ـ وبذلك يكون لنا مجموعة من الميقاتيات المتميزة ، مما يعطي معنى لفكرة مقارنة تواتر ايقاعاتها(أزمانها) فيما بينها . فالأرض مثلاً بطيئة الحركة جداً (إذا قورنت بالضوء) بالنسبة للتجمع المحلي للمجرات ، مما نستطيع معه أن نتخذ زمنها وسيلة جيدة للتأريخ في هذا السلّم الواسع الذي يتناوله بالدراسة راصد يتحرك مع تجمعه المجرّي المحلي . على أن الراصد القاطن في صاروخ سريع بالنسبة للأرض سيكون له ، إزاء الحوادث الكونية ، سلّم زمني مختلف ، فهو لا ينتمي الى أي من المراجع المتميزة وقد يرى ، بسبب حركته السريعة ، أن بعض المجرات تقترب منه بدلاً من أن تبتعد .

إن هذا الزمن الميقاتي الشامل يسمى الزمن الكوني ، وبما أنه لحسن الحظ يكاد يتطابق مع زمن الأرض ، فإنه يتيح لنا أن نقارن الحوادث التاريخية على الأرض بشتى الحوادث الكونية . ونورد هذه المقارنة في الجدول ٥ ـ ١ الذي يساعد القارىء على أخذ فكرة عن الفترات الزمنية التي نناقشها في هذا الفصل .

ونعود الى نماذج فريدمان لنقول إن العينات الثلاث الموضحة في الشكل ٥ ـ ٥ نحصل عليها من حل معادلات آينشتاين الحقلية باهمال ضغط محتويات الكون (الضغط مصدر تثاقل في النسبية العامة) . وهذا تقريب جيد في الوقت الحاضر ، لأن المفعول الثاقلي لكتلة كل مادة المجرات أعظم بكثير من مفعول الضغط الصغير في العالم (الناجم عن الاشعاع رئيسياً) . ولهذه النماذج سمة معنوية تختص بها تشكيلة كبيرة من النماذج التي تنطوي على فرضيات معقولة بخصوص سلوك المحتوى المادي ، ألا وهي أن معدل التوسع يتناقص باستمرار بمرور الزمن . وكل المنحنيات المرسومة في الشكل تنعطف بالتدريج نحو الأسفل . وقد أشرنا الى الوضع المتوقع في الوقت الحاضر . ومن ذلك ينتج أن المضروب السلّمي R كان في وقت معين صفراً ، بموجب كل واحد من هذه النماذج . وهذا يعبر عن القول الفيزيائي بأن المجرات ، التي تبدو الآن في حركة تباعد بعضاً عن بعض ، كانت بلا ريب متعشكلة معاً في ماضي الزمن السحيق . وهذا الظرف الكوني ، قرب انعدام R ، يتطلب مناقشة دقيقة سنؤجلها حتى نستكمل عرض سمات نماذج فريدمان .

الجدول ٥ ـ ١ . تاريخ الكون : في الأعلى ، منظوراً إليه الآن نحو الماضي ، في الأسفل ، منظوراً إليه منذ الانفجار الأعظم نحو المستقبل .

السمة المميزة	العمر بالسنوات
الثقافة التكنولوجية	١٠٠
الحضارة	١٠ ٠٠٠
الجنس البشري	٥ ملايين
الثدييات	٢٠٠ مليون
الحياة الأرضية	٣ مليارات
الأرض	٥ر٤ مليارات
العالم الكوني	١٠ ـ ٢٠ مليار

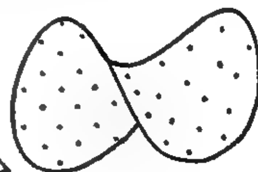


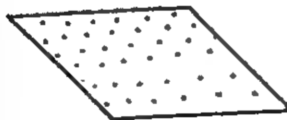
وبالقاء نظرة على الشكل ٥ ـ ٥ نستطيع أن نتنبأ بمستقبل العالم . ففيه نرى إمكانيتين مختلفتين تماماً . فالنموذجان 1 و 2 يدلان على استمرار التوسع الى الأبد . ولفهم سبب ذلك بسهولة نقول مايلي .

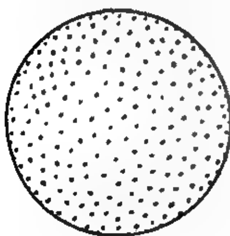
إن كثافة المادة في النموذج 1 ضعيفة لدرجة أن التوسع يتغلب بالتدريج على التجاذب الثقالي الذي يُبطئه ليصبح ، بعد زمن معين ، حراً بشكل رئيسي ، مما يتيح للمجرات أن تفلت بعضاً من ثقالة بعض . أما في النموذج 2 فالكثافة كبيرة بما يكفي لاستمرار التجاذب الثقالي في لجم التوسع فترة أطول ودون أن يوقفه تماماً . لكن هذه الكثافة عظيمة في النموذج 3 بما يكفي لتحويل التوسع ، بعد أن يبلغ R قيمة عظمى ، الى تقلص يلمّ المجرات من جديد بعضاً على بعض ، وفي النهاية ترتص المجرات معاً ، على شاكلة «قطرة» نيوتن ، فتعود الى ظروف تشبه الظروف التي كانت سائدة في بدء التوسع .

إن سبب وجود هذه النماذج الثلاثة المتباينة يترجم عن حقيقة أن هندسة الفضاء لعالم نسيق يمكن أن تتخذ أشكالاً ثلاثة متباينة . وهذه الأشكال تتمثل ، كتشبيه أولي في الشكل ٥ ـ ٦ ، بالفضاء المنحني نحو الداخل (كالكرة) وبالفضاء المنحني نحو الخارج (كالسرج) وبالفضاء المنبسط (كالمستوي) . فالكثافة العظمية ، أي النموذج الذي سيتقلص ، تجعل الفضاء منحنياً نحو الداخل ، وعلى شاكلة نموذج آينشتاين ، ذا حجم منته . أما في غير ذلك ، وعند فريدمان ، فنجد فضاء كروياً ، متوسعاً أو متقلصا على شاكلة نُفاخة تنتفخ أو تتضاءل .

شكل ٥ ـ ٦ . الهندسة الممكنة لعالم يتوسع . هنا أيضاً تحاكي الرقعة ذات البعدين بعض سمات الفضاء الثلاثي . إن «النفاخة المتوسعة» ، في (a) ، تقابل نموذج فريدمان 3 الذي يصور عالماً سيعود الى التقلص . أما (b) فيقابل النموذج 2 المنبسط (الاقليدي) الذي تعلمنا هندسته في المدرسة . لكن الفضاء ، في (c) ، «منحن نحو الخارج» ، بعكس الانحناء نحو الداخل في (a) . إن (b) و (c) ، كليهما ، ممتدان بلا انتهاء ، لكن (a) منته .







إن النموذج الذي يمثله المنحني 2 في الشكل ٥ ـ ٥ يصور فضاء منبسطاً اقليدياً ، في حين أن النمـوذج «الهـارب» 1 يصـور انحناء الفضاء نحو الخارج . وكلا النموذجين هذين يصوران فضاءً لا متنهي الحجم . هذا وإن فكرة توزع لا نهائي الانتشار لمجرات تتوسع فكرة صعبة الادراك أحياناً على بعض الناس . إذ لو كانت المجرات تملأ الفضاء كله في الأصل ، فالى أين تتوسع ؟ لكن على القارىء أن يتذكر أن المجرات لا تتوسع عبر فضاء ثابت ، لكنها محبوسة في فضاء يتوسع . وهذا يعني ببساطة أن سلّم كل المسافات يتزايد في كل مكان .

٥ ـ ٣ خلق العالم ؟

إذا كان العـالم يتـوسـع الآن ، فهـذا يعني أنـه كان في المـاضي أكثر ارتصاصاً . والمنحنيات المرسومة في الشكل ٥ ـ ٥ تشير ، بما لا يقبل الشك ، الى أن المدى السلّمي للمسافات كان ، في وقت ما من ماضٍ محدد ، متضائلاً الى R = صفر . فهذ النقطة تمثل بدء التوسـع في نماذج فريدمـان . وتحديد هذا الوقت بالدقة يتوقف نوعاً ما على تحديد النمـوذج المختـار من بين النـماذج الثـلاثة . وبقياس سرعة ابتعاد المجرات الواقعة على مسافة معينة منا في الوقت الراهن نستطيع أن نحسب معدل التوسع ، وهو المعدل الذي يتفق مع موقعنا الراهن على المخطط المرسوم في الشكل ٥ ـ ٥ . وظاهر على هذا الشكل أن السلوك الماضي يكاد يكون واحداً في النماذج الثلاثة كلها ، ويبدو أن وقت R = صفر يقع بين ١٠ و ٢٠ مليار سنة ماضية .

واذا تذكرنا أن R يعين سلم المسافة بين أي مجرتين ، فإن انعدام R يتعلق بوضع تتلاقى فيه المجرات كلها ، وتتقلص كل الأطوال في هذا العالم الى الصفر . وهذا يعني ، في مدى معناه ، أن حجم كل الفضاء الذي نراه ، حتى في أضخم المراقب ، يتضاءل حرفياً الى لاشيء .

ينتج من ذلك أن كل المادة في العالم المرصود ، تلك التي تتجمع لتصنع المجرات بملايين نجومها وغبارها وغازها وما يقع فيما بينها من مواد ، كانت في وقت ما مرصوصة في نقطة رياضياتية وحيدة ذات كثافة لا نهائيةَ الكبر ! وهذا مايسمى متفرداً في النسبية العامة

الحديثة . ولقد تحدثنا عن المتفردات في الفصل الرابع بمناسبة الثقوب السوداء . والواقع أن ظروف العالم في نموذج فريدمان ، وفي بدء التوسع ، تماثل الظروف في مركز ثقب شفارتزشلد الأسود . فما هو مدى الثقة التي يجب أن نوليها للمتفرد ؟ لنتذكر ، من الفصل الرابع ، أن المتفرد ليس في الحق جزءاً من النظرية . فعندما تصبح كثافة المادة لا نهاية الكبر تصبح معادلات آينشتاين الحقلية عديمة المعنى أمام توصيف الوضع. وإن ماينطوي عليه وجود المتفرد ، في نموذج فريدمان ، هو أن النسبية العامة ، وربما حتى توصيف المكان ـ الزمان نفسه ، لابد أن تنتقض في تلك المرحلة المبكرة . ومن المعروف بالطبع أن نظرية الكم في الحقل التثاقلي هي التي ستسود عندما يصبح مدى السلّم المعتبر صغيراً لدرجة كافية . وهذا لا يحدث ، في حالة العالم الكوني ، حتى تتقلص كل محتوياته المنظورة الى حجم من رتبة كبر نواة ذرية واحدة ، وهذا يحدث بعد ١٠-٤٣ ثانية فقط من بدء التوسع . غير أن شيئاً واحداً يبقى كافي الوضوح ، وهو أن صفات المكان ـ الزمان لاتستمر ، في المتفرد ، على ماكانت عليه .

اذا كان المكان ـ الزمان عديم الوجود في المتفرد ، فإن النقطة R = صفر ، في نماذج فريدمان ، تصف ظرفاً يقفز فيه المكان ـ الزمان الى الوجود . فحدوث متفرد فريدمان في هذه النظرية قد أدى الى الاعتقاد الشائع بأن التوسع يمثل خلق العالم . هذا وإن نظرية المتفرد هي بالتأكيد أكثر الأفكار ، التي اكتشفها العلم حتى الآن ، قرباً من عملية الخلق . وإذا كان المتفرد قد حدث فعلاً بالشكل الذي تصفه نماذج فريدمان فليس بالامكان أن نواصل الفيزياء ، أو المحاكات الفيزيائية ، عبر المتفرد لنصل الى مرحلة تسبق حدوثه . وهذا يعني أن لا شيء مما له صلة فيزيائية بالعالم المرصود يمكن أن يكون قد حدث قبل بدء التوسع ، وأن هذا الظرف هو الذي يبدو مستجيباً لمتطلبات عملية الخلق .

إذا أخذنا نماذج فريدمان بحرفيتها فإن كل المادة في هذا الكون ، لا المكان ـ الزمان وحده ، قد قفزت الى الوجود مع المتفرد . وقد اتفق أن كانت هذه الفكرة في خلق العالم الفكرة الوحيدة التي يقبلها فيزيائيو الجسيمات الأولية . لكننا ذكرنا أن الجسيمات الأولية تحمل علامات متعددة الأنواع تحتفظ عادة بها عندما تطفر بعضاً الى بعض ، أو لدى تخلق هذه الجسيمات أزواجاً . وهذا يحظر على المادة أن تتخلق دون أن تتخلق مادتها

المضـادة . في حين أن كل القـواعـد الفيزيائية ، التي على هذه الشـاكلة ، تتحـطم في المتفرد ، الذي يمكن أن تتخلق المادة فيه دون أن تكون مصحوبة بالمادة المضادة .

على أن ثمة سمة مهمة لهذه الصورة العلمية للخلق ، وهي أن ما خُلق كان المادة والمكـان ـ الـزمان كليهما معاً . وهذا يخالف ماتنص عليه الكتب المقدسة التي تقول بأن الأشياء المادية خُلقت في فراغ موجود سلفاً . لكن قبل بدء التوسع ، هنا ، لم يكن يوجد لا مادة ولا مكان ولا زمان . ويجب أن ننظر للمتفرد على أنه حد بدئي زمني لكل شيء ، وعلى هذا فليس ثمة سؤال عما حدث قبل الانفجار الأعظم ، لأن كلمة «قبل» تنطوي على ترتيب زمني ، وهـذا الـترتيب عديم الـوجـود في المتفرد . وهذا القول ينسحب على مسـألـة البحث عن السبب . فكثيراً ما يتساءل المرء عن الشيء الذي تسبب في حادثة الخلق . لكن تحديد السبب والمفعول في الترتيب الزمني (السـبب يسبق المفعول دوماً) أمر مشكوك فيه على كل حال ، وعلى هذا فإن الاعتقاد بأن الخلق لابد له من سبب يسبقه أمر ليس له مايسوغه بالضرورة . وفوق هذا فإن فكرة التسـبب المسبق عديمة المعنى هنا لأن الاعتبـارات الزمنية لايمكن أن تمتد الى ماقبل المتفرد . فكل هذه المحاكمات تشهد على أن حادثـة الخلق في نظرية النسبية أعمق فيزيائياً بكثير ما ورد في الكتب المقدسة . هذا وسنعـود في الفصل السابع الى بعض نتائج ماقلناه هنا ، وذلك في ضوء تحليل اللا تناظر الزمني في علم الكون .

إن معظم علماء الكون يميلون الى تقبل التفسير الذي تتمخض عنه نماذج فريدمان الكونية . لكن الأمر الذي يتجادلون بشأنه هو مدى انطباق السمات المبسطة لهذه النماذج على الأوصاف الحقيقية للعالم الواقعي .

لقد ذكرنا أن النماذج المشروحة هذه تهمل في حسابها ضغط العالم . بيد أن المادة عنـدمـا ترتص تولد ضغطاً مضاداً يعارض استمرار الارتصاص . وهذا يجعلنا نتوقع أن يمنع هذا الضغط العالم الكوني من أن يستمر في التقلص حتى يقترب من انعدام R . والحقيقة أن الضغط يقوم بدور هام جداً في مراحل التوسع المبكرة . وهذا الدور ناجم في معـظمـه عن اشعاع العالم . ولنتذكر أن طيف الضوء يتزاح نحو الأحمر بفعل التوسع . هـذا يعني أن الضـوء كان في المـاضي منـزاحاً في الاتجاه المعاكـس ، أي نحو التواترات

الأعلى ، وبالتالي ذا طاقة أكبر . لكن الضوء يسلِّط ضغطاً متناسباً مع طاقته (يمكن أن نتأكد من وجود هذا الضغط الذي يولد ، على ضعفه ، دوراناً في دولاب خفيف مجنح موضوع في الخلاء ومنار بمنبع ضوء قوي) . وضغط الاشعاع يشتد تدريجياً في مراحل التوسع المبكرة .

والضغط مصدر ثقالة أيضاً في النسبية العامة . والحقيقة أن ضغط الاشعاع سيطر في هذا الشأن على كثافة المادة أثناء مليون سنة أو نحوها بعد بدء التوسع . وبسبب المفعول التثاقلي للضغط لا يمكن لانضغاط العالم أن يتوقف ، وهو ، بدلاً من أن يساهم في إبطاء R عن الاقتراب من الصفر ، يسرّع هذا الاقتراب عملياً . وعلى هذا لا يمكن اجتناب المتفرد في نماذج فريدمان بحجة مفعول الضغط .

يوجد دليل أولي على مدى الجدية في حدوث متفرد في العالم الواقعي ، ونستمده من دراسة نماذج أكثر عمومية من نماذج فريدمان . والحقيقة أن أحد الألغاز البارزة في حالة العالم المرصودة هو سبب كونه على هذه الدرجة من التماثل في كل شيء . إن جزءاً من هذا اللغز ناجم عن حقيقة أن كل نقطة من العالم المتوسع محوطة بأفق ، على شاكلة مايحيط بثقب أسود ، وهذا الأفق يمنع بتاتاً أي اتصال فيما بين المناطق المنفصلة بمسافات كافية . فالأفق الذي يحيط بنا اليوم يبعد عنا بمسافة ١٠^٢٨ سنتيمتراً - أي حوالي عشرة مليارات سنة ضوئية . وفي تلك التخوم تبتعد المادة عنا مسرعة جداً لدرجة أنها ، بمعنى ما ، تبلغ سرعة الضوء (انزياح لا نهائي نحو الأحمر) ، أما في ما بعد ذلك من فضاء فلا نستطيع أن نأمل في أي اتصال معه . والأفق يبتعد بمرور الزمن . وقد يحدث اتفاقاً أن تكون المادة الأبعد من ١٠^٢٨ سم مرئية من الأرض في المستقبل .

وعلى عكس ذلك ، كان الأفق في الماضي البعيد قريباً جداً . ففي نماذج فريدمان كان الأفق بعد ١٠^-١٨ ثانية من بدء التوسع صغيراً لدرجة إمكانية ايلاجه في حجم لا يزيد عن حجم الذرة الواحدة . والمشكلة هي : إذا كانت مثل هذه المناطق الصغيرة من العالم منفصلة سببياً منذ بدء التوسع ، فإن كل منطقة لا يمكن أن «تدري» بما تفعل أية منطقة أخرى ، فكيف إذن تدبر العالم المرصود أمره كي يتوسع كله بمعدل واحد ؟

ثمة جواب عن هذا السؤال يقول إنه لا يفعل ذلك . فهناك إمكانية أن يكون

العالم قد بدأ توسعه بشكل عشوائي فوضوي ، وأن آلية مبكرة أو مخمدة تدخلت فيها بعد فتسببت في التسوية . وهذا الافتراض القائل بالفوضى التامة البدئية ، بدلاً من التناظر التام البدئي ، يتمتع بمزية إضافية تغنينا عن أن نعتبر أن العالم قد تخلق في ظرف خاص جداً . واذا استطعنا اكتشاف آلية مخمدة فانها ستبيح لنا تشكيلة واسعة من ظروف بدئية تنسجم مع حالة العالم الراهنة . وسنعود الى بحث هذه النقطة في الفصل السابع .

لقد قُدمت اقتراحات عديدة بخصوص هذه الآلية . فمنها ما يجعل السبب لزوجة النترونات عندما تكون عظيمة الكثافة جداً . ومنها ، وهو ما ينتصر له الكونيون الروس ، يستند الى تخلق الجسيم . وقد كنا ذكرنا في الفقرة ٤ ـ ٤ كيف يمكن أن تتخلق الأزواج (جسيم/جسم مضاد) عندما تتوفر كمية من الطاقة تساوي $E = 2mc^2$. وهذه الطاقة يمكن أن تُستمد من مفعول المد والجزر في الحقل الثقالي . وفي هذه الآلية تتخلق ، بالمعنى الحرفي الكامل لهذه الكلمة ، أزواج الجسيمات والجسيمات المضادة خارج الفضاء المتوتر الحالي . ولهذا التخلق مفعول ارتكاسي من شأنه أن يزيل توترات الفضاء . وكلما تعاظم ابتعاد هندسة الفضاء عن فضاء منكوفسكي استفحل انتاج الجسيمات . ونتيجة ذلك ، في فضاء تسود فيه الحركة الفوضوية ، أن أثر هذا الانتاج لابد أن يتجلى في تسوية الظروف باتجاه الاتساق الراهن . وربما أمكننا ، بواسطة هذه الفكرة ، حتى أن نعتبر أن تخلق المادة كلها في هذا العالم قد تم بهذه الطريقة ، لا في المتفرد . وهذه الآلية ، التي تتنبأ بانتاج مقادير متساوية من المادة والمادة المضادة ، تتميز عن المتفرد البدئي بأنها لا تنتهك قوانين انحفاظ «العلامات» في تخلق الجسيمات . وهذا الانتاج المتساوي لا يشكل مشكلة اذا استطعنا اكتشاف آليةتفصل المادة عن المادة المضادة وتحول دون معظم عمليات فناء احداهما مع الأخرى من جديد . ومنذ بضع سنوات أعلن الفيزيائي الفرنسي أومنيس R.Omnès عن وجود آلية من هذا القبيل تعتمد على أمور مستمدة من فيزياء الجسيمات الأولية . إن هذا الفصل يمكن أن يحدث على شكل مجرات مصنوعة من المادة وأخرى مصنوعة من المادة المضادة ـ ترتيب كوني مأمون تماماً لأن المجرات لا تتصادم لا نادراً . وعلى هذا يجب على كل مسافر فضائي أن يتحلى بالحكمة ليتأكد ، قبل أن طلق الى مجرة أخرى ، أن تلك المجرة ليست مصنوعة من مادة مضادة لمادته . وحتى

إشعار نظري مدروس آخر يكشف عن مدى الثقة التي يمكن أن نضعها في مثل هذه الأفكار (لقد لاقت أعمال أومنيس انتقادات عديدة)، يبدو أننا مانزال أمام خيار جمالي بين تناظر المادة والمادة المضادة في فوضى بدئية وبين تناظر بدئي «أملس» ليس للمادة فيه مايقابلها في الميزان .

وللوهلة الأولى يبدو أن الانطلاق من اتساق كامل يمكن أن يمنع حدوث المتفرد البدئي . ففي نموذج فريدمان يحدث هذا المتفرد حين تتجمع كل المادة في نقطة واحدة . وإذا كانت الحركة أكثر فوضوية فقد تمنع مثل هذا التجمع . على أن ايليس وهوكنغ قدما ، ضمن فرضيات معقولة تخص سلوك المادة في الكثافة العالية ، برهاناً رياضياً أنيقاً على أن تكوّن متفرد واحد على الأقل في عالمنا أمر لا يمكن تجنبه ، ولو بانحرافات عن الاتساق الكامل . ولا تقدم هذه النظرية معلومات كثيرة عن طبيعية المتفرد أو عن ظروف العالم في جواره ، سوى أن كل جسيم يرد عليه يفقد وجوده في عالمنا المكاني ـ الزماني . ولدى تحليل عدد من هذه النماذج اللا متناهية واللا متجانسة يتبين أن السلوك الماضي للعالم ، عندما يقترب من ظروف تشكل المتفرد ، يمكن أن يكون معقداً جداً إذا قورن بالتطور الأملس نحو الانطفاء ، ذلك التطور الذي تقدمه نماذج فريدمان .

ورغم أن الانحرافات عن الاتساق لا يمكنها ، على مايبدو ، أن تزيل من عالمنا العقبات التي تعرقل تشكل المتفرد في منطقة مامن المكان ـ الزمان ، فقد يحدث لمعظم المادة في هذا العالم أن «تطيش» عنه ، وعلى هذا ، وبالرغم من أن المكان ـ الزمان له «حافة» ، فإن مادة هذا العالم لا تحتاج الى الولوج فيها لزاماً . وقد أطلق اسم «التنهدات» (لتمييزها عن «الانفجارات الأعظم») على مثل هذه النفثات التي تركبها المادة لتبرز من «قرب» المتفرد ذي الكثافة التي ، على عظمها ، لاتبلغ قيمة لا نهائية الكبر .

وهناك أيضاً إمكانية أن تُنتهك نظرية هوكنغ ـ ايليس اذا كان سلوك المادة ، عندما تبلغ كثافتها قيمة مفرطة ، بعيداً عن السلوك العام المتوقع . وقليل هم الفيزيائيون المستعدون لايلاء أهمية كبيرة للكثافة المفرطة التي تنتهك شروط النظرية لأن هذه الشروط معقولة جداً (إنها لا تتطلب أساسياً سوى أن تبقى طاقة المادة وضغطها موجبين) . وعلى كل حال ليس معروفاً ، وإن كان غير متوقع ، فيما إذا كان يمكن للطاقة أو الضغط أن يأخذا قيماً سالبة في مرحلة ما . فبعض خواص المادة الكمومية يمكن بالفعل أن تسمح

لمضغوط السالبة بالحدوث في بعض الظروف (المصطنعة تقريباً) ، لكن النماذج الكونية لمنطوية على متفردات حرة والمعتمدة على هذه الظروف بعيدة بعداً كبيراً عن عالمنا لواقعي .

وفي سوية أعمق يمكن لمفعولات المكان ـ الزمان الكمومية (أي الثقالة لكمومية) ، بدلاً من مفعولات المادة الكمومية ، أن تمنع انطفاء العالم على شكل متفرد ، لنقل بأن تجعل العالم «ينزو» الى حالة كثافة عالية بشكل كاف . بيد أننا لانملك حتى لآن ، كما ذكرنا في الفصل الرابع ، نظرية ثقالية كمومية مرضية ، مما يبقي هذه لامكانية في حدود التخمين البحت . وقد جرت محاولات للالتفاف على بعض العقبات الرياضية الفنية التي تحول دون التوصل الى نظرية ثقالية كمومية ناجزة ، وذلك بمعالجة نموذج كوني بسيط المأخذ كجملة كمومية ، ثم امتحنت على أساسه فرضية «النزو» ، لكن النتيجة كانت ضبابية ومهلهلة . وعلى كل حال فنحن لاندري الجدية التي يجب أن نوليها لهذا النوع من علم الكون الكمومي ، وذلك بسبب الصعوبات التي تنشأ لدى تفسير ميكانيك الكم عندما يُتخذ العالم كله كجملة كمومية .

إذا نجت أكثرية مادة هذا العالم من المتفرد ، أو كان هناك نزو كمومي من نوع ما ، فلا بد عندئذ من التساؤل عن الظروف التي كانت سائدة في العالم قبل حدوث هذا النزو . وبسبب التناظر الزمني الذي تنطوي عليه النسبية العامة ، فإن النظرية تتنبأ بأن حركة العالم ، في السلّم الواسع وفي ذلك الطور السابق ، كانت المعكوس الزمني للطور الذي نحن فيه . وهذا يقودنا الى القبول بأن العالم كان ، قبل التوسع الحالي ، في حالة تقبض ، وكان مفترضاً فيه أن يحوي ، في سلّم أصغر ، مجرات ونجوماً وعلماء كونيين ، ولو كان ذلك في حقيقته من قبيل التخمين البحت . هذا وسنعود في الفصل القادم الى استقصاء نتائج هذه النماذج الخالية من أية عملية خلق محددة .

إن معظم الكونيين يميلون اليوم الى القبول بمتفرد فريدمان كصورة لحادثة خلق حقيقي في العالم الواقعي . وعلى هذا يجدر بنا أن نطرح على بساط المناقشة ، ولو بايجاز ، المسألة التالية : هل استطاع المكان ـ الزمان أيضاً أن يضع نفسه في «ظرف خلق» من هذا القبيل ؟ لقد شبهنا المتفرد البدئي الكوني بالمتفرد الذي يتشكل في مركز ثقب أسود . إن هذا صحيح جزئياً فقط . فالانفجار الأعظم يمثل في الحقيقة المعكوس

الزمني للثقب الأسود . فأولها انفجار المادة نحو خارج المتفرد ، في حين أن الثقب تقبض نحـو الداخل . كما أن هذا الفرق ليس لفظياً فقط . فالأفق المحيط بكل المناطق ، في الانفجـار الأعظم ، هو المعكوس الزمني للأفق المحيط بالثقب الأسود ، وعلى هذا فإن المتفـرد الـذي يتشكل في مركز الثقب لا يمكن أن نراه من الخارج ، في حين أن المتفرد الذي بدا منه التوسع الكوني يكون «عارياً» . وهذا يعني مبدئياً أننا يمكن أن نلقي بنظرنا نحـو داخـل العـالم ونحو ماضي الزمان (بسبب الزمن الذي يستغرقه سفر الضوء) لنرى عملية الخلق .

هذا ولا نستـطيع عملياً أن نرى المـاضي قبـل مرور حوالي ١٠° سنة على بدء التـوسع ، لأن المواد الكونية كانت غير شفافة أمام الضوء قبل ذلك التاريخ . وعلى كل حال يظل قائـماً المبـدأ الهام القائل بأن العالم منطقة من المكان ـ الزمان مطوية في السمة السببية للمتفرد ، مما يجعل طبيعة العالم عصية على التنبؤ بحال من الأحوال . فلا نستطيع أن نقـول ، ولو مبدئياً ، مايمكن أن يخرج من المتفرد . وهذا يتفق مع مانفهمه في علم الكـون عن الـلا تناظر الزمني الذي يوحي (راجع الفصل السادس) ، بمعنى ما ، أن العالم انبثق بشكل عشوائي .

٥ ـ ٤ الانفجار الأعظم

مهما كانت الأوصاف التي تخص المراحل المبكرة الأولى للتوسع فإن نماذج فريدمان تبقى قاعـدة العمـل الرئيسية التي يعتمدها علماء الكون . ولدى القبول مؤقتاً بأن R = صفر يترجم ببساطة عن حادثة حقيقية ، نستطيع أن نفحص بتفصيل كبير العمليات التي تقع في عالم فريدمان وهو في مراحل التوسع المبكرة . فبعض نتائج هذه العمليات يمكن رصدهـا اليوم ، مما يتيح لنـا أن نمتحن معقولية هذا النموذج البسيط في مواجهة شتى نتائج القياسات الرصدية . وواضح أن عالم فريدمان ينقاد جيداً لهذه الدراسة ، نظراً لبساطته .

هذا ورغم استحـالـة الاستمـرار في الفيزياء المعروفة الى ماض أبعد من اللحظة الأولى ، أو حتى الى ما قبـل تدخـل الثقـالـة الكمـومية في اللحـظة ١٠^-٤٣ ثانية ، فإن بالمستطاع بناء نموذج كوني لما حدث بعد ١٠^-٤ ثانية أو نحوها من البدء وذلك بشيء من

الثقة المعقولة بأن الفيزياء تصلح فيه جيداً . وإن رسم مخطط لمسيرة الكون في تلك الأوقات المبكرة القصيرة المذهلة ، لمهمة من أعظم المهام ابداعاً وعبقرية في تاريخ العلم . إذ أن المرء لايصدق أن بالامكان حقاً استنتاج معلومات ذات معنى عن ظروف العالم عندما كان عمره أقل من ثانية واحدة .

إن محتويات العالم ، كأية جملة فيزيائية ، تسخن عندما تنضغط وتبرد عندما تتوسع . فالانزياح الشهير للأمواج الضوئية نحو الأحمر ، والذي اكتشفه هوبل ، يمكن أن يعتبر تبرداً للضوء ناجماً عن التوسع الكوني . وينتج عن ذلك أن العالم كان ، في أثناء المراحل المبكرة للانفجار الأعظم ، حاراً جداً بالفعل ، وذلك بسبب الانضغاط الهائل . ولهذا السبب يقال إن محتويات العالم كانت تشكل آنئذ كرة نارية بدئية .

لم يكن يمكن أن يوجد في بنية الكرة النارية آنئذ شيء من قبيل النجوم والمجرات التي نراها اليوم في هذا العالم . ولابد أن الذرات نفسها كانت ممزقة فتاتاً في تلك السخونات والضغوط الهائلة . أي أن الكرة النارية كانت بلا شك تتصرف كمائع يتألف من جميع أنواع الجسيمات الأولية التي كانت تتفاعل بشدة وفي حالة من التوازن الحراري .

إن بعض علماء الكون يبدون شيئاً من التحفظات إزاء إمكانية البحث في ظروف الكرة النارية في أوقات أبكر من مكروثانية (جزء من مليون جزء من الثانية) لكننا نتناول القصة انطلاقاً من هذا التاريخ ، عندما كانت الحرارة في حدود مليون مليون درجة مئوية . ورغم أن برهة المكروثانية تبدو صغيرة جداً في سلّم البشر ، إلا أنها زمن طويل جداً في فيزياء الجسيمات الأولية . ولابد أن تفاعلات عظيمة مهمة قد حدثت في تلك البرهة المبكرة العنيفة النشاط جداً ، وذلك فيما بين أنواع غريبة من جسيمات لم يزل بعضها غير معروف في المخبر . ورغم أن القسم الأعظم من فيزياء هذه الجسيمات الأولية مايزال ضبابياً حتى اليوم ، لكن المؤكد أن كل الجسيمات ، باستثناء أكثرها شيوعاً ، لابد أن تكون قد اختفت بالتفكك في نهاية المكروثانية الأولى ، تلك البرهة الخاطفة من مجد العالم ـ الذي كان مليئاً بمليارات المليارات من الجسيمات الغريبة ـ التي تلاها زمن أبدي خلا من بعض الجسيمات التي قد لاتظهر ثانية أبداً !

ولدى هبوط درجة الحرارة بسرعة من ١٠١٢ درجة تبدأ الكرة النارية الفترة التي

تسمى فترة اللبتونات المصحوبة ببروتونات ونترونات والكترونات ترافقها ميونات ونترينوات وإشعاع كهرطيسي (على شكل فوتونات غاما) مختلطة كلها معاً في حالة توازن . وكان الاشعاع حاراً لدرجة أن تتخلق منه أزواج الكترونية ـ بوزترونية . وفي أثناء هبوط درجة الحرارة تبدأ الميونات بالاختفاء أولاً ثم البوزترونات . وبعد قرابة عشر ثوان تكون الحرارة قد هبطت الى بضعة مليارات درجة وبدأ الدور الرئيسي يتركز على البروتونات والنترونات والالكترونات .

وعنده هذه المرحلة تبدأ فترة جديدة مهمة تسمى فترة البلازما. وفيها تنخفض الحرارة لدرجة تتيح للنترونات والبروتونات ، في حركاتها المسعورة ، أن تبدأ معاً بتشكيل نوى الهليوم وبضع نوى ذرية خفيفة أخرى . وتدل الحسابات المفصلة على أن قرابة ربع البروتونات تصبح جزءاً من نوى الهليوم ، مع نسبة تافهة من نوى الدوتيريوم والليتيوم وعلى هذا فإن نسبة عدد نوى الهليوم ، في النوى المغادرة للكرة النارية ، تبلغ قرابة ١٠٪ ، والباقي نوى الهدروجين (بروتونات افرادية) . وهذه القيم العددية قريبة جداً من الوفرة الحالية المقيسة لهذه العناصر الخفيفة ، مما يمنحنا ثقة كبيرة في أن الكرة النارية البدئية هي حقاً أحد عوامل البناء الرئيسية المذكورة في الفقرة ٥ ـ ١ . وهذا أيضاً شاهد قيمّ على أن العمليات التي تحدث في فترة البلازما ، وفي العالم الواقعي ، ليست بعيدة عما توحي به الكرة النارية في نموذج فريدمان الكوني .

وتستمر فترة البلازما قرابة ٧٠٠ ٠٠٠ عام تكون الحرارة قد انخفضت بعدها حوالي ٤٠٠٠ درجة مطلقة (أبرد قليلاً من سطح الشمس) تبدأ عندها الالكترونات بالتراكب مع النوى لتشكيل الذرات العادية . ونحن نعلم مايحدث بعد ذلك من التئامات محلّية مكثفة للمادة بفعل التجاذب الثقالي . وتتشكل أسراب من الغاز تدوّم جماعات تتقبض بالتدريج لتشكل مجرات وربما نجوماً وكواكب .

لقد انخفضت منذئذ درجة حرارة الكرة النارية بسبب التوسع الكوني المستمر والآن ، وبعد انقضاء عشرة مليارات عام ، بلغت في انخفاضها قرابة ثلاث درجات ـ الصفر المطلق ـ أقل من سخونة الهواء السائل . هذا ويجب أن نعد من جملة الاكتشافات العظيمة في تاريخ العلم أن بقية متضائلة من لمعان تلك الكرة النارية البدئية قد اكتشفها

فيزيائيان أمريكيان ، بنزياس A. Penzias وويلسون R. Wilson ، عام ١٩٥٦ . وهو اكتشاف معروف باسم اشعاع القاع الكوني . إن هذه «المستحاثة» الشاهدة على الولادة النارية للعالم قد سافرت ، دون أن تتشوه كثيراً ، عبر الفضاء منذ نهاية فترة البلازما . وهذا الاشعاع يرد اليوم على الأرض من كل نواحي السماء . وإن وجوده يعطي ثقة كبيرة بصحة الافكار العامة حول نموذج الانفجار الأعظم الحار ، وبأن العالم كان في طور كثيف متفجر قبل حوالي عشرة مليارات سنة .

٥ ـ ٥ النظريات الكونية اللا معتمدة

لقد تمحورت حتى الآن جل المناقشات التي عرضناها في هذا الكتاب حول النظريات الكونية المستمدة من نماذج فريدمان التي مثلناها بالشكل ٥ ـ ٥ ، وإن كنا ، فيما يخص المرحلة المبكرة جداً ، قد خرجنا عنها بعض الشيء خروجاً ربما يكون ذا معنى . وسبب هذا الالتزام يعود الى أنه يعكس الرأي الشائع جداً في أوساط الفلكيين والكونيين حين كتابة هذه السطور . والواقع أن كثيراً من معطيات الرصد الفلكي ماتزال من قبيل المحاولات الناقصة ، مما تسبب في نشوء آراء عديدة مختلفة في الماضي ، وقد يحدث مثله في المستقبل .

لقد اقتُرحت ، من وقت لآخر ، نماذج أخرى يختلف أغلبها جذرياً عن نموذج الانفجار الأعظم المعتمد . وكثير من هذه النماذج الكونية البديلة يعتمد على تعديل نظرية آينشتاين في النسبية العامة وحتى على هجرها أحياناً وابدالها بنظرية تثاقل أخرى ، أو باعتماد جملة مبادىء جديدة . ومن هذه البدائل نخص بالذكر نظرية الحالة الراسخة التي كان لها في علم الكون تأثير عظيم دام عدة سنوات .

إن هذه النظرية لا تنطوي على انفجار أعظم ، وهي بذلك تتناقض مع الشواهد التي تدل ، كما يدل إشعاع القاع الكوني ، على أن العالم كان في وقت ما من الماضي في حالة سخونة وكثافة عاليتين . أما انعكاسات هذه النظرية على طبيعة الزمن فسنعرضها في الفصل القادم .

أما النماذج اللا معتمدة الأخرى ، والتي تنطوي على انفجار أعظم ، فربما كان أجدرها بالذكر نوعان : يعتمد أحدهما على ادخال حد إضافي كوني تنافري على معادلات

آينشتاين في النسبية العامة ، ويقول الآخر بأن ثابتة التثاقل الكونية ، G ، تتغير بمرور الزمن . وقد ذكرنا في الفقرة ٥ ـ ٣ أن آينشتاين كان قد أدخل تعديلاً على معادلاته الأولى في النسبية العامة بهدف الحصول على نموذج كوني يكون سكونياً ، وذلك قبل أن يكتشف هويل أن العالم في حالة توسع . ورغم أن المعادلات المعدلة تشكل منافساً مقبولاً تماماً في مجال توصيف الثقالة ، إلا أن الحد الاضافي كان له نتائج غريبة ، وفي رأي بعض الكونيين ، غير مرضية . فقد كان للحد الاضافي الجديد مفعول فيزيائي ينطوي على قوة تنافر في كل نقطة من الفضاء . وقد تمكن آينشتاين ، من خلال موازنة التنافر الكوني بالتجاذب الثقالي ، من صنع نموذج عالم سكوني . على أن هذا التوازن الدقيق قلق في الواقع ، مما يتيح لأي اضطراب ضعيف يطرأ عليه أن يحيله الى حالة تقبض أو توسع دائم .

وهناك نماذج عديدة ، متجانسة ومتناحية ، تنطوي على تنافر كوني وتفضي الى هذا النوع من التوسع الدائم . وبما أن التنافر يتزايد ، في العالم الواقعي ، مع المسافات الفاصلة بين النقاط ، فإن مفعول التوسع سيولد المزيد من التنافر . وعلى ذلك يكون العالم في حالة توسع متنام دائم . أي أن R سيتزايد أسياً ، وبذلك ينمو الفضاء بتسارع متزايد خالد ، لا على شكل النماذج المبينة في الشكل ٥ ـ ٥ والتي تظهر تباطؤاً في عملية التوسع . فأحد هذه النماذج ، وهو الذي قدمه الفلكي الألماني دوسيتر W.de Sitter (١٨٧٢ ـ ١٩٣٤) ، يقود الى هذا النوع من التوسع الدائم ولكن دون أن يحتوي على أية مادة ـ إنه فضاء خال متوسع فحسب !

إن بعض هذه النماذج التنافرية (لا كلها) يتوسع انطلاقاً من R = صفر ، مما يجعلها مرشحة لأن تكون عوالم ذات انفجار أعظم ، ونخص بالذكر نموذج ادينغتن ـ لوميتر ـ A.Eddigton G.Lemaître الذي يتكشف عن نوع من السلوك مثير جداً . فهو ينطلق من التوسع على شاكلة نماذج فريدمان العامة المعتمدة ، ولكن مع معدل تباطؤ ناجم عن التجاذب الثقالي للمادة . ويتفق أن يتفوق التنافر الكوني على التجاذب الثقالي ويستمر التوسع الدائم . على أنه عندما يحدث توازن تقريبي بين هذين المفعولين يبقى العالم في حالة شبه سكونية . وطور «الرسو» هذا يمكن جعله طويلاً بقدر مانريد ، وذلك باختيار قيمة للتنافر الكوني قريبة من القيمة التي اختارها آينشتاين ليحصل على عالم سكوني .

وقد انبعث هذا النموذج الى الوجود منذ بضع سنوات كتفسير ممكن لفرط الوفرة في عدد الأجرام المسماة كوازارات quasars والمرصودة بفضل الانزياح الكبير نحو الأحمر .

وهنـاك اتجـاه جديد أسـاسياً نحـو نظرية كونية اقـترحهـا عام ١٩٣٧ الفيزيائي البريطاني ، الحائز على جائزة نوبل ، ديراك P.Dirac . لقد تعجب ديراك ، كما تعجب الفلكي إدينغتن ، من المساواة التالية :

$$\frac{\text{قطر العالم}}{\text{قطر الالكترون}} = \frac{\text{القوة الكهربائية}}{\text{القوة الثقالية}}$$

(فكلا النسبتين تساوي $١٠^{٤٠}$ تقريباً) . على أن قطر العالم ، كما ذكرنا في الفقرة ٥ ـ ٥ ، يتزايد باستمرار مع تقهقر الأفق ، وهذا يدعو الى الاعتقاد بأن هذه المساواة قد حصلت بالصدفة في هذاالزمن الذي نعيشه والعالم في حالة توسع لا في حالة أخرى . وسنعود الى بحث هذه «الصـــدف» في الفقـرة ٧ ـ ٣ . على أن ديراك لا يرى في هذه المسـاواة بين النسبتـين مجرد صدفـة ، بل يقـول أنها تظل قائمة في كل زمان . وهناك ، لتعليل هذه الامكـانية ، اقـتراح يقول بأن قوة الثقالة تضعف بمرور الزمن . والمعدل المطلوب لهذا الضعف نحصـل عليه من جعـل G متناسباً مع 1/t وبذلك تتناقص G بمرور الزمن t . وهذا يقود إلى عالم شبيه بنموذج فريدمان رقم 2 ، لكنه يتوسع أسرع منه بمرتين ، (لأن تنـاقص G يجعـل التوسع « أسهل ») ، وأن عمر العالم ، بالتالي ، أقل بمرتين . وهذه النتيجة الأخيرة تطرح مسألة في السلّم الزمني . إذ لو كان العالم يتوسع فعلاً بالمعدل الذي يقتضيه نمـوذج ديراك لكـان عمـر العـالم الآن أقل من ١٠ مليارات عام ، في حين أن القياسات الرصدية تشير إلى أن مجرتنا قد تكونت قبل ١٠ مليارات عام على الأقل . على أن اقتراح ديراك تطور إلى نظرية متكاملة لدى جوردان P. Jordan ثم لدى برانز C. Brans وديك R. Dicke . وقـد اكتسبت هذه النظرية مؤخراً صيغة تجعلها منافساً خطيراً لنظرية آينشتاين ، ولا تطرح مشاكل صعبة بخصوص سلم الزمن .

وانطلاقاً من وجهة نظر مختلفة تماماً اقترح الفلكي البريطاني هويل F. Hoyle وزميله الهندي نارليكار J. Narlikar نظرية مماثلة في التثاقل ذات G تابع للزمن وتُشتق فيها كتلة

الجسيم من تفاعله مع مادة بعيدة ، على طريقة ماخ . وفوق ذلك اضطلع ديراك نفسه ، وكـان له من العمـر ٧٥ عامـاً ، بتطوير فكرته عام ١٩٣٧ إلى نظرية متكاملة من طراز برانـز ـ ديك وتـوصل إلى نتائج تختلف عن نتائج أعماله الأولى . إن كل هذه النظريات تسـاق اليوم إلى الإمتحان الرصدي في المنظومة الشـمسية من خلال حركة الكواكب التي لابـد أن تتـأثر قليلاً إذا تناقصت ثابتة التثاقل ببطء . والمستقبل ، بارصاده المتواصلة ، لابد قادر على كشف أي تغير محسوس في G .

٦ البـــدء والنهـــاية

٦ ـ ١ العالَم القلق

لقد بينا في الفصل الثالث أن قوانين الفيزياء لا تميز اتجاهاً عن اتجاه آخر في حركة الزمن . فاللاتناظر الزمني ، الذي يتجلى بوضوح في وقائع الحياة اليومية بشتى مظاهرها من سلوك الغـازات إلى ضياع الحـرارة وانتشـار الأمـواج ، لا يمكن تعليله بأية خاصية أصيلة من خصـائص الجملة المدروسة . فهو في كل الأحوال مفروض من الخارج بفعل التشكل العشوائي للجمل الفرعية ـ مناطق من العالم شبه معزولة ومنفصلة عن بيئتها الأم في حالة غير متوازنة .

ولدى الفحص عن كثب نرى أن معظم الجمل الفرعية تنتمي إلى ترتيب تسلسلي من نوع ما . ومثال مكعب الجليد الذي سقناه في الفقرة ٣ ـ ١ يقدم توضيحاً جيداً لهذا القول . فعندما تتشكل جملة فرعية من وضع مكعب جليد في وعاء من الماء الغالي يتوطد لاتناظر زمني ، لأن ظرف الأنتروبية المنخفضة لمحتويات الوعاء ينتقل بالنتيجة ، وباحتمال طاغ ، إلى ظرف توازن للماء الحـار في درجة حرارة نسيقة . فاللا تناظر الزمني قد فُرض على الجملة بالواسطة التي كوّنتها ، أي بتنفيذ عملية التكوين بشكل عشوائي لا بتدخل تفـاوت من التفـاوتات النادرة جداً . والآن يبقى السؤال التالي : كيف حصل في البدء الاختلال الذي أتاح تكوّن مركبتي محتوى الجملة في درجتي حرارة مختلفتين ؟ إن الجواب يمكن أن يكون هنا : « الثلاجة » . إن الثلاجة جملة فرعية محفوظة بصورة دائمة في حالة اختـلال ، وذلـك عن طريق تغـذيتهـا بالـطاقة . والمغذي الطاقي هو أيضاً جملة فرعية للأسبـاب التـالية . هنـاك وقـود ما (نفط أو فحم مثلاً) يوضع بتماس مع نار . وهذه الجملة تتكون في حالة اختلال عنيف ثم تنتقل سريعاً إلى التوازن بالاحتراق . والاختلال الـذي يجلبـه الـوقود يتوقف على طريقة تكوينه الأولية . ففي حالة الوقود النفطي يكون الأصل بيولوجياً . وكل الجمل البيولوجية الفرعية تعمل في ظروف من الاختلال الشديد

تستمده في الأصل من حرارة الشمس وضوئها . ولو اختفت الشمس لاختفت بعدها كل حياة على الأرض .

إن قدرة الرياح والأمواج تتعلق هي الأخرى ، وفي نهاية الأمر ، باشعاع الشمس . وهذه القدرة تصل إليها بفضل الاختلال السائد في جو الأرض والناجم عن التوزع اللا متساوي للإشعاع الوارد على سطح الأرض . لو فكرنا قليلاً لاكتشفنا أن اللا تناظر الزمني السائد على سطح الأرض مستمد ، كله تقريباً ، من هذا الاختلال الأصلي في توزع إشعاع الشمس . وهناك من الشواهد ما لا يكاد يحصره العد : النشاط البيولوجي برمته ، الحياة والموت ، انصهار الثلج ، حت الرياح للصخور ، العواصف الكهربائية ، التيارات البحرية . . .

والأمر لا يخلو من ظواهر لا ينبع فيها اللا تناظر الزمني من أشعة الشمس . فثوران البراكين ومواقع النيازك والمد والجزر ناجمة كلها (إلى حد ما على الأقل) عن اختلالات ثقالية . والمواد المشعة ، بشتى أنواعها ، هي أيضاً في حالة اختلال ظاهر للعيان ، ولا يخلو أصلها من بعض الأهمية ، وسنبحثها الآن بشيء من التفصيل .

لقد شرحنا في الفقرة ٥ ـ ١ كيف جاء الاقتراح بوجود عامل كوني في تشكل النوى الذرية الثقيلة . فأحد هذه العوامل كان الكرة النارية البدئية في الانفجار الأعظم . بيد أن الحسابات البدئية لا تفي لتعليل تشكل كل العناصر الثقيلة بهذه الطريقة وبالنسب الملحوظة . ولما كانت النوى الثقيلة لا تستطيع النجاة من الانفجار الأعظم ، فلابد أن تكون قد تشكلت لاحقاً في مكان ما . ولكن أين ؟ هناك ، كما ذكرنا سابقاً ، المناطق الداخلية في النجوم حيث يؤدي تشكل العناصر الثقيلة إلى تحرر الطاقة التي تمد إشعاع النجم . ويُقبل اليوم عموماً أن النجوم ذات الكتلة الكبيرة هي العامل الأهم في تشكل العناصر الثقيلة . ويتم ذلك باختصار كما يلي . انطلاقاً من الهدروجين يتشكل الهليوم بالتدريج أثناء طور الهدوء المستقر (إن شمسنا اليوم في منتصف هذا الطور) . ثم يسخن الهليوم بما يكفي لبناء نوى أثقل (الكربون خصوصاً) . وهذه النوى تثابر هي الأخرى على تشكيل عناصر أثقل منها ، وهكذا تستمر سلسلة طويلة على هذا النحو . لكن تفاصيل هذه السلسلة معقدة جداً وتتحكم فيها دقائق الفيزياء النووية . وهكذا ،

ومهما يكن ، فلابد من أن تحوي هذه النجوم نسبة ضعيفة من العناصر الثقيلة . وأثقل هذه العناصر (كالأورانيوم) يجعل النجم يفقد عملياً جزءاً من طاقته ، لأن نوى هذه العناصر تحرر طاقة عندما تعاني عملية الانشطار النووي ، وذلك بعكس النوى الخفيفة التي تصدر طاقة عندما تعاني عملية الاندماج المعاكسة .

ولكن كيف تخرج هذه العناصر الثقيلة من بطن النجم إلى المناطق الخارجية من المجرة ؟ إن آلية هذا الخروج تتوفر أثناء الانفجار المذهل للمستعرات العملاقة Super-novae ـ نجوم هائلة السطوع غالباً ما تعصف بها كارثة عظيمة تنسفها وتحيلها إلى شظايا وتحرر طاقة أعظم بملايين المرات من وسطي طاقة اشعاع نجوم . وهذه الحوادث نادرة جداً لحسن الحظ . ويُظن أن واحداً منها قد حدث في مجرتنا وسجله الفلكيون الصينيون عام ١٠٥٤ كنجم يبلغ سطوعه سطوع كوكب الزهرة(*) . وبعد بضعة أيام خفتت شدة نوره . أما ما تبقى منه فهو اليوم جرم ضبابي مضطرب الشكل يسمى سديم السرطان ، ويتألف من كتلة غازية تطير متناثرة بسرعة كبيرة مبتعدة عن جرم صغير قرب المركز يُظن أنه نجم نتروني .

وبعد أن ينثر عناصره الثقيلة بهذا الأسلوب في فضاء المجرة ، يكون النجم الميت قد وفر المادة الهبائية لتشكل سلالة جديدة من النجوم الغنية بهذه العناصر الجديدة . والمنظومات الكوكبية التي تصاحب السلالة الثانية لابد أن تحوي نسباً كبيرة من هذه العناصر . وعمر شمسنا لايزيد عن نصف عمر العالم أو أقل ؛ وبذلك يكون قد توفر الوقت الكافي للمستعرات أن تتفجر (مهما كان ذلك نادراً) وتنثر في فضاء المجرة كل عناصرها الثقيلة . وهذا ما يوحي لنا بفكرة أن الفحم (وهو أساس الحياة الأرضية) الموجود في أبداننا ليس سوى رفات الموت العنيف الذي طرأ على سلالات النجوم قبل دهر طويل .

وطبقاً لهذه الصورة في تشكل العناصر وتوزعها نستنتج أن المواد المشعة الأرضية ، التي توفر لنا حالةُ الاختلال التي هي فيها قسطاً من الطاقة التي نحولها إلى كهرباء ، تدين

(★) لقد اكتشف مؤخراً (٢٣ شباط ١٩٨٧) في سديم ماجلان مستعر عملاق يتفجر مصدراً سيلاً غزيراً من النترينوات . ومايزال هذا المستعمر موضع بحث . (المترجم) .

بهذا الاختلال للظروف التي سادت في بطن النجوم التي ماتت منذ زمن سحيق .

وهكذا ، بأسلوب أو بآخر ، فان معظم الاختلال المحيط بنا ، والذي يجبر الأشياء حولنا على أن تتطور بمرور الزمن ، يدين بوجوده إلى تكوّن الشمس والنجوم . وهذا النموذج من الاختلال الكامن في ضوء النجوم وفي تشكل النوى الذرية يتكرر في شتى مناطق العالم . فالكون برمته موجود في حالة قلقة ، ويضم مفازات واسعة من الخلاء البارد منشورة فيه ، هنا وهناك ، نجوم بيضاء ساخنة . ومخازن الطاقة الضخمة هذه تصب إشعاعاً نجمياً تحاول بواسطته أن تعدل الميزان لبلوغ التوازن الحراري .

لقد تحدثنا عن الاختلال الترموديناميي العالمي بمناسبة مفارقة أولبرس في الفقرة ٥ ـ ١ . لكن هذه المفارقة لا تُحل إلّا لتقود إلى مفارقة أخرى . إذ كيف وقع العالم في هذا القلق في أول الأمر ؟ انه السؤال نفسه الذي صادفناه بمناسبة الجمل الفرعية ؛ لكن المرء لا يستطيع هنا أن يتذرع بتدخل خارجي للإجابة عن هذا السؤال ، لأنه يتعامل الآن مع العالم الكوني كله ، حيث لا شيء « خارجياً » عنه يتدخل في شئونه .

إن المرء يستطيع طبعاً أن يطعن في هذه المسألة ببساطة قائلًا : إن العالم خُلق هكذا لدى الانفجار الأعظم ، مع اختلال قائم تولّد مباشرة منذ البدء . لكن هذا الطعن له محذوران قد يوجبان رفضه ، أحدهما فلسفي والآخر فيزيائي . فمن المفروض في العلم أن يفسر أوصاف بيئتنا . وهذا ما لا يفعله القول بأن الأشياء هي كما هي لأنها كانت كما كانت . هذا أولاً . أما ثانياً فهناك شواهد جيدة على أن العالم كان ، في وقت ما من الماضي ، في حالة توازن حراري ؛ ومن هذه الشواهد اشعاع القاع الكوني . فاذا كان التوازن قد حدث حقيقة ، فكيف تم حدوث الاختلال الراهن ؟ كيف تحول العالم المتزن إلى عالم قلق ؟ إن التوازن مصحوب بانتروبية (أي فوضى) أعظمية , فكيف تم للعالم الفوضوي اللا مرتب أن تحول إلى عالم مبني مرتب ، وكل تجاربنا تبين أن الترتب هو الذي يتحول إلى فوضى ، لا العكس ؟

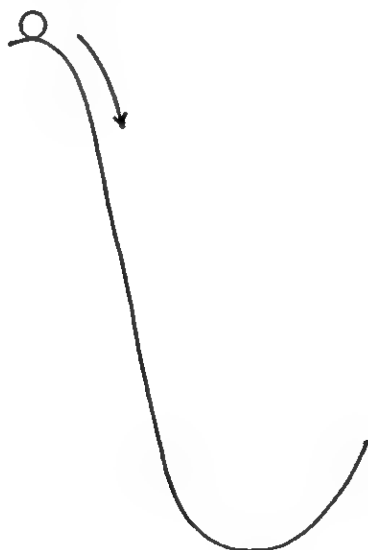
للجواب عن هذا السؤال لابد لنا من العودة مرة أخرى إلى مراحل التوسع المبكرة جداً كي نفحص بعناية بعض ما حدث في كرة النار البدئية .

فهناك أولاً طبيعة القلق الكوني التي يجب أن تفهم بتفصيل أكثر . فالقلق (في

المدى الواسع على الأقل) هو نتاج ضوء النجوم . والاشعاع يستمد طاقته من تشكل نوى العناصر الثقيلة في بطن النجم . فعندما تندمج نواتان يتحول جزء من مجموع كتلتيهما إلى طاقة إشعاعية (وفق علاقة آينشتاين $E= mc^2$) ترشح ببطء من خلال طبقات النجم الخارجية ثم إلى الفضاء المحيط . وهذه العملية تمثل تزايداً في الأنتروبية لأن الطاقة التي كانت مخزونة في النوى تتبدد في الفضاء الخارجي ؛ وهذه عملية يمكن اعتبارها تزايداً في الفوضى . والنوى المندمجة تصبح ، بعد تخليص نفسها من بعض طاقتها ، أكثر استقراراً في نواة جديدة .

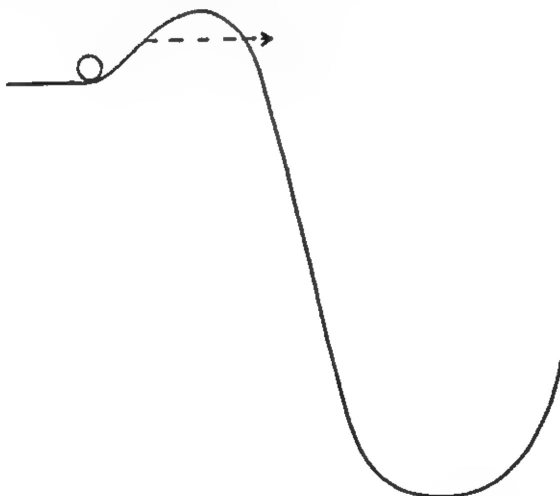
إن هذا المبدأ في بلوغ الاستقرار بالتخلص من الطاقة مبدأ عام حقاً . فالكرة الموضوعة على قمة تل (شكل ٦ ـ ١) غير مستقرة ، لأن أي حركة تطرأ عليها تجعلها تتدحرج نحو أسفل السفح ، وتكتسب أثناء ذلك طاقة حركية على حساب طاقتها الثقالية الكامنة (وهي الطاقة التي صُرفت لحملها إلى قمة التل) . فسرعتها المكتسبة تتيح لها أن

شكل ٦ ـ ١ . القلق . إن الكرة الموضوعة على قمة التل هي في ظرف قلق . فأي اضطراب يطرأ عليها يجعلها تتدحرج بفعل الثقالة نحو الوادي . وقد تتخلص أثناء ذلك من كل طاقتها (بفعل الاحتكاك) وتصل ساكنة إلى توازن مستقر في قعر الوادي .



تتجاوز الوادي وتتسلق السفح المقابل في الاتجاه المعاكس ؛ لكن بعض طاقتها ستضيع بالاحتكاك مع الأرض وبمقاومة الهواء وتتحول إلى حرارة تنتشر في الوسط الخارجي (وتزيد بالتالي في قيمة الانتروبية بموجب قانون الترموديناميك الثاني) . وهكذا ، شيئاً فشيئاً وأثناء تدحرج الكرة هبوطاً وصعوداً ، تتبدد طاقتها بعيداً وتهدأ في النهاية ساكنة مستقرة في قعر الوادي . فالطاقة التي كانت تملكها وهي في قمة التل قد بذلتها لبلوغ وضع التوازن المستقر في أسفل الوادي . ونشاط الكرة المنظم قد تحول إلى نشاط فوضوي (حرارة) في الحركات الذرية ، طبقاً لقانون تزايد الانتروبية .

شكل ٦ ـ ٢ . الاستقرار العابر . الكرة مفصولة عن السطح بحاجز قليل الارتفاع . فهي ، رغم توازنها ، في وضع استقرار عابر ، لأنها لو دفعت بما يكفي من القوة لتجاوزت الحاجز وسقطت نحو أسفل الوادي . وهذا يشبه ما يحدث في الفيزياء النووية حيث يتمثل الحاجز بالتنافر الكهربائي بين البروتونات ، والوادي بقوة جذب النواة . وهذه القوة ، على قصر مداها ، شديدة البأس ، فلو قرع بروتون النواة وهو مسرع جداً فسيتغلب على الحاجز الكهربائي (أو يتوغل فيه) ويدخل في النواة ، باذلاً طاقته على شكل أشعة غاماوية .



إن هذا المثال يمكن أيضاً أن يستخدم بسهولة لايضاح مفهوم الاستقرار العابر . ففي الشكل ٦ ـ ٢ رسمنا التلة مع منخفض صغير في قمته إن الكرة الموضوعة في هذا المنخفض تكون في حالة توازن محلي ، لأن الاضطراب الضعيف لا يخرجها من المنخفض ؛ إذ لو دُفعت بتؤدة إلى أحد الجانبين ، فان حركتها تقتصر على العودة إلى مكانها . لكنها لو دُفعت بعنف فستتسلق الحاجز ثم تتدحرج على سفح التلة . فنقول عن الكرة التي في هذا المنخفض الصغير إنها في حالة استقرار عابر .

والآن أبدل الكرة بنواة ذرة خفيفة ، ولنقل الهدروجين على سبيل التحديد ، وأبدل ثقالة الأرض (التي تجذب الكرة نحو القاع) بقوة الجذب الشديدة التي تسلطها أية نواة أخرى . فالبروتون (نواة الهدروجين) يريد أن « يتدحرج هابطاً » إلى « قاع » النواة الجاذبة ، وكان سينجح في مسعاه لولا أنه مشحون بالكهرباء . فشحنة البروتون هذه منبوذة بشدة من قبل كل الشحنات المماثلة التي تحملها بروتونات النواة الهدف . لكن القوة النووية ، رغم شدتها الجاذبة الشديدة ، قصيرة المدى جداً ، وسيعاني البروتون صعوبة كبيرة في اجتياز الحاجز الكهربائي النابذ كي يبلغ مجال فعل النواة الجاذب . وهكذا سيجد البروتون نفسه في وضع استقرار عابر ، وممنوعاً من السقوط ضمن النواة بحاجز كهربائي . فاذا كان اندفاعه ضعيفاً فسيرتد عن الحاجز متراجعاً . أما إذا كان اندفاعه شديداً « فسيتسلق » الحاجز ، أو قل ينفذ منه إلى أحشاء النواة حيث « يندمج » باذلاً ، بنتيجة ذلك ، طاقة تصدر على شكل إشعاع غاماوي . فالبروتون الذي ارتبط بالنواة قد بلغ حالة استقرار في قاع « الوادي » النووي .

إن ذرات الهدروجين في البيئة الأرضية لا تبلغ ، في هياجها الحراري ، طاقة تكفي للتغلب على الحاجز الكهربائي . وعلى هذا ، ورغم أن الهدروجين في حالة استقرار عابر ، بمحدود القول ، فانه لا يبلغ الطاقة الكافية لحدوث الاندماج النووي إلاّ في درجات حرارة هائلة . والواقع أن اجتياز الحاجز الكهربائي يتعزز قليلاً بفعل ميكانيك الكم الذي يقول بأن البروتون يستطيع أن يحتال بالاختفاء لبرهة قصيرة جداً (وذلك بالضبط كالبروتونات الخفية التي تتخلق من لا شيء ولبرهة وجيزة) . وهذه البرهة ، على قصرها ، تكفي البروتون « المختفي » للسير مسافة صغيرة والظهور في الجانب الآخر من

الحاجز . وهذا المفعول معروف ، لأسباب بديهية ، باسم مفعول النفق . فاذا أخذنا بعين الاعتبار مفعول النفق فان الحساب يدل على أن البروتونات يجب أن تكون في حرارة تبلغ عدة ملايين درجة لتصبح قادرة على الاندماج معاً لتشكل نويات من الهليوم . (الواقع أن هذا الاندماج لا يتم في مرحلة واحدة . وهو يتطلب أيضاً إسهام نترونين) . ويمكن أن نستنتج من ذلك أن درجة حرارة أحشاء النجوم ، كالشمس التي هي الآن في طور حرق هدروجينها ، تبلغ ملايين الدرجات .

وهكذا ، وبعد أن أثبتنا أن عدم الاستقرار في هذا العالم ناجم حقاً عن الاستقرار العابر للهدروجين ، علينا الآن أن نفهم لماذا كان العالم مصنوعاً من الهدروجين أساسياً .

إذا التزمنا بنموذج الانفجار الأعظم الساخن كخط أساسي صحيح ، ينتج أن العالم كان بالضرورة في مراحله الأولى مؤلفاً من مكونات مادية فردية ذات حركات مستقلة بسرعات نسبوية . ولابد أن تكون سخونته الهائلة قد تسببت بتفتيت كل النوى ومكوناتها إلى شظايا بمقدار ما تستطيع احتواءه . ولابد أن الظرف الترمودينامي لهذه الكرة النارية البدئية كان ظرف توازن محلي . لأن المادة كانت ، رغم توسع العالم وتبرده السريعين ، قادرة بكثافتها العالية على تدبير أمرها ، بشكل شبه آني ، لتنسجم مع الظروف المتغيرة . ومهما يكن الأمر فان درجة الحرارة قد هبطت ، بعد بضع مئات من الثواني ، بما يكفي لاتاحة الفرصة للبروتونات وللنترونات المتحركة كي تندمج معاً في نوى مركبة لا يفككها الاشعاع الشديد لدى تشكلها . والواقع أن بعض التشكيلات النووية تحدث فعلاً وأن الحساب يدل ، كما ذكرنا في الفقرة ٥ ـ ٤ ، على أن قرابة ربع عدد البروتونات تدخل في نوى هليوم ، مع نسبة ضئيلة جداً من عناصر أخرى كالدوتيريوم والليتيوم . لكن الحاجز الكهربائي يقوم هنا بدور حاسم . ففي أثناء فترة محدودة فقط تكون درجة حرارة البلازما منخفضة بما يكفي لمنع تفكك نوى الهليوم المتشكلة وعالية ، مع ذلك وفي الوقت نفسه ، بما يكفي لتتغلب البروتونات على الحاجز الكهربائي . وبعد حين توقف تشكل النوى بفعل الحاجز وبلغت البروتونات حالة استقرار عابر لتصبح اتفاقاً ذرات هدروجين .

إن أسلوب انتقال العالم من التوازن إلى الاختلال أصبح الآن واضحاً . فلو كان العالم قد ظل كرة نارية لما نشأ اللاتناظر الزمني على الشكل القائم في عالمنا الواقعي

الراهن . لكن تغير الظروف في أثناء توسع الكرة النارية قد غير نمط توازن المادة من أفراد جسيمات تتحرك منفصلة فيما بينها إلى نوى ثقيلة . فأصل اختلال توازن العالم كامن إذن في توسعه . وهذا التوسع المديد هو الذي يخفف من حدة مفارقة أولبرس التي ناقشناها في الفصل الخامس .

٦ ـ ٢ الماضّ في المستقبل

لندع الآن جانباً النتائج الكونية عموماً والانفجار الأعظم خصوصاً وما ينجم عنهما من لا تناظر ترموديناميي زمني ، ولنركز اهتمامنا على المجربات اللا تناظرية التي ناقشناها في الفصل الثالث ، أي تلك التي تنتمي إلى الحركة الموجية المتأخرة .

ففي عام ١٩٤٥ نشر ويلر J. Wheeler وفاينمان R. Feynman ، وهما اثنان من أميز الفيزيائيين النظريين الأمريكيين في سنوات ما بعد الحرب ، تفسيراً جديداً أنيق البساطة لسير الأمواج الكهرطيسية في هذا العالم نحو الأمام حصراً أو ، بتعبير أوضح ، فسرا لماذا لا تسافر الأمواج الراديوية إلاّ إلى الأمام لا إلى الخلف في الزمان . ومن العجيب أن السبب الكامن في أعماق نظرية ويلر ـ فاينمان لا يتصل مباشرة باللاتناظر الزمني بل يعود بالأحرى إلى بنية الجسيمات الأولية المشحونة . فقد كان هذان العالمان يهدفان إلى إزالة الصعوبات الرياضية التي كانت تعترض توصيف تفاعل الجسيمات المشحونة مع الحقل الكهرطيسي . ورغم بعض النجاح الذي أصابته هذه النظرية في ذلك الاتجاه ، إلاّ أن كل المحاولات التي هدفت إلى ايجاد صيغة كمومية لها عادت فاصطدمت من جديد بتلك الصعوبات الرياضية . ولهذا السبب فقدت هذه النظرية كثيراً من مزيتها الأولى ، وأصبحت مسوغات القبول بها أقل إلزاماً .

إلاّ أن فكرة ويلر وفاينمان كانت ، من الابداع والجاذبية ، على جانب كبير جعلها أساساً لكل أنواع التأمل في موضوع اللا تناظر الزمني وفي علم الكون ، وعلى الأخص لدى علماء الكون أنفسهم . وكان هويل ونارليكار من أكثر أنصار نظرية ويلر ـ فاينمان حماساً لها . فقد ما ، لفكرتها الأصلية ، تعمياً في نظرية تثاقل جديدة (ناقشناها بايجاز في الفقرة ٥ ـ ٥) ، وحتى في نظرية جسيمات أولية . ونحن لن نخوض هنا في تلك النتائج الأعم ، بل سنكتفي بمناقشة فكرة ويلر وفاينمان الأصلية .

لنتذكر أن مكسويل كان أول من دمج قوانين الكهرباء والمغنطيسية المعروفة في نظرية حقل كهرطيسي واحد تنبأت بوجود أمواج كهرطيسية . وآلية نشوء هذه الأمواج تكمن في التيار الكهربائي ، وهو ناجم كما نعلم عن حركة جسيمات مشحونة بالكهرباء ، كالالكترونات . ولكي يصبح الجسيم المشحون منبع أمواج لابد أن يكون متسارعاً . والحقل الكهرطيسي المحيط بالجسيم مجبر على التكيف مع حركة الجسيم المتغيرة ، وينتشر الاضطراب الناجم بعيداً على شكل أمواج . وهذه الأمواج تحمل طاقة ؛ مما يمكن معه القول بأن الجسيم يشع ، أو يصدر إشعاعاً . ولابد لهذه الطاقة الاشعاعية من ثمن ، ويبدو أنها تصدر على حساب طاقة الجسيم ، مما يؤدي إلى تهدئة حركة التسارع . وتنجم عن هذه التهدئة قوة تتسلط على الجسيم ، وتسمى قوة التهدئة الإشعاعية . وهذه القوة صغيرة جداً عملياً . ويطلق على فرع الفيزياء الذي يعالج تفاعل الحقول الكهرطيسية مع الجسيمات المتحركة اسم الالكترودیناميك (التحريك الكهربائي) .

ولما كان الالكتروديناميك المستمد من نظرية مكسويل ذا تناظر زمني تام ، فانه لا يتعارض مع إمكانية حدوث العملية المعاكسة ، أي مع إمكانية أن يمتص الجسيم المشحون الأمواج الكهرطيسية التي تصادفه . وهذه ظاهرة معروفة جيداً أيضاً . وبيت القصيد في النظرية الجديدة هو أن هذه الظاهرة لا تنبيء عن صحة عكوسية الترموديناميك ، بل عما يلي : ان الجسيم المسرَّع بشكل اختياري « يسبب » إشعاعاً لأمواج متأخرة ذا صورة مترابطة في حركة تنتشر إلى الأمام إنطلاقاً من جوار الجسيم . فهو لا « يسبب » العملية المعاكسة ، أي نشوء أمواج انطلقت من مناطق منثورة في كل أرجاء العالم ، وتقدمت من كل النواحي حتى ارتطمت بالجسيم على صورة موجة مترابطة فامتصها . أي بمختصر العبارة : إن الأمواج المرتبطة هي الأمواج الصادرة ، أما ما يُمتص فهي الأمواج اللا مرتبة . وهذا يعني ، بتعبير آخر ، أن الجسيم المشحون المتسارع يرسل أمواجاً نحو المستقبل ، لا نحو الماضي . (إن الموجة « المرسَلة نحو الماضي » تعبر لغوياً عن رجوع زمني معكوس يصور موجة قادمة من الماضي يمتصها الجسيم . وقد أوردناه لا لسهولة استخدامه فحسب ، بل لأنه يجنب أيضاً ادخال تعبير رديء يحجب التناظر الزمني الذي سيظهر فيما يلي) .

لم يغير ويلر وفاينمان الشكل الأساسي لنظرية مكسويل لكنهما وجدا ، للاتجاه المستقبلي في حدوث الإشعاع ، سبباً أعمق من القول بأن العالم ، بكل بساطة « مصنوع هكذا » . وقد عملا ذلك بتحليل ما يمكن أن يحدث لو كان بمقدور الجسم المشحون المتسارع أن يُصدر إشعاعاً نحو الماضي والمستقبل على السواء . فارسال الإشارات نحو الماضي يثير بالطبع معارفات تشبه تلك التي صادفناها بخصوص التاخيونات التي ذكرناها في الفقرة ٢ ـ ٥ . وواضح أن هذا النوع من سلوك الجسيم الفرد المشحون يناقض التجربة مناقضة صريحة . على أن ويلر وفاينمان تكهنا بأنه يمكن أن توجد حركة جماعية لعدة جسيمات متماثلة ، يصدر عنها أمواج يمكن أن يتخذ مجموعها الشكل المألوف والمقبول للتأخر الناجز (المستقبلي أو الذاهب نحو الخارج) ، رغم أنها إفرادياً ذات تناظر زمني .

كيف يمكن أن يحدث هذا ؟ إن الآلية الكامنة هنا هي ظاهرة التداخل المعروفة جيداً . وخير طريقة لمشاهدة مفعول التداخل هي استخدام الأمواج المائية . فلو أسقطتَ حصاتين معاً في نقطتين متجاورتين من سطح ماء بحيرة ساكن فان صورتي الموجتين المنطلقتين من مسقط كل حصاة تتداخلان معاً فترسما صورة سلسلة من الذرى والوهاد المتعاقبة على التناوب . فحيث تلتقي ذروتان ، أو وهدتان ، آتيتان من المسقطين تتولد بتضافرهما ذروة أعلى بمرتين ، أو وهدة أخفض بمرتين . أما حيث تلتقي ذروةٌ آتية من أحد المسقطين مع وهدة آتية من المسقط الآخر فيحدث تعطيل للحركة ويظل الماء في مثل هذه المناطق على سكونه الذي كان ، أي دون أي اضطراب .

ويحدث في الأمواج الضوئية أيضاً تداخل معروف . فالمناطق المخططة الملونة التي نراها ، بفضل النور المنعكس عنها ، على بقعة من الزيت عائمة على سطح الماء ناجمة عن تفانٍ تداخلي لبعض الأطوال الموجية (الألوان) التي كان يحويها النور الوارد على البقعة ، وعن تضافر تداخلي لبعضها الآخر .

لقد توصل ويلر وفاينمان إلى النتيجة الهامة التالية . تصور أن جسيماً مشحوناً مفرداً في حيزٍ خالٍ يشع ، أثناء تحريكه ، أمواجاً يتقدم نصفها نحو الماضي ويتأخر النصف الآخر نحو المستقبل . إن هذا الجسيم نفسه ، إذا كان موضوعاً ضمن صندوق غير

شفاف ، لن يشع سوى أمواج متأخرة نحو المستقبل . وإذا فتحت الصندوق فان الأمواج المتقدمة تظهر من جديد !

إن ما يحدث ضمن الصندوق هو التالي . إن الأمواج الصادرة عن الجسيم المتسارع تتحرك خارجة منه حتى تصطدم بالسطح الداخلي للصندوق فتحرك الالكترونات المشحونة الموجودة في ذراته . إن الأمواج المتأخرة (المتحركة عبر المستقبل) تصدم الصندوق بعد هنيهة من مغادرة جوار الجسيم ، لكن الأمواج المتقدمة تصدم الصندوق قبل أن يحدث تحريك الجسيم ! وعلى هذا فان الكترونات الصندوق ، بمفارقة عجيبة ، تهتز مستبقةً حركة الجسيم التي تسبب هذا الاهتزاز . إن فكرة نشوء جواب ، في جدران الصندوق ، سابق زمنياً لأسبابه فكرة غريبة بعض الشيء ، لأن خبرة البشر تقضي بأن يسبق السبب مفعوله مهما كانت الظروف . لكن الفيزياء لا ترى فرقاً معنوياً بيّناً بين السبب والمفعول ؛ لأن كل ما يهمها هو التفاعل (المتبادل) . فمن المباح إذن أن نبادل بين السبب والمفعول أو أيضاً أن يوجد سبب يلي في الزمان مفعوله ، شرط أن يكون كل شيء قائماً بذاته :

إن اهتزاز الكترونات الصندوق (قبل حركة الجسيم الأصلي المشحون وبعده) سيولد عنها نفسها أمواجاً تشع هي الأخرى ، بموجب فرضية ويلر وفاينمان ، نحو الماضي والمستقبل كليهما . وعلى هذا فان الجسيم الأصلي المتحرك ، عندما يوضع ضمن الصندوق ، يصبح مرتبطاً مع نمط مركب يضم أمواجاً متقدمة ومتأخرة من جدران الصندوق . وهذه الأمواج كلها ستتداخل معاً بأسلوب معقد جداً . فالسمة البارزة لعمل ويلر وفاينمان كانت البرهان بحساب بسيط ، في حالة صندوق عديم الشفافية تماماً (بحيث لا يمكن لأية موجة قادمة من الخارج أن تنفذ إلى جوفه) ، على أن الأمواج المتقدمة من الصندوق تعطل الأمواج المتقدمة من الجسيم المنبع ؛ وهي فوق ذلك تعزز الموجة المتأخرة من الجسيم المنبع لتبلغ بها أقصى الشدة . وأثر الأمواج الجوابية من الصندوق على كل الجسيمات المشحونة يكون في تعطيل كل الحركات المستبقة ، التي تحدث قبل تحريك الجسيم المنبع ، وفي إنتاج القوة الملائمة بالضبط للتعويض عن قد التهدئة الإشعاعية التي تنجم عن انتقال الطاقة من الجسيم إلى جدران الصندوق وهكذا يظل السلوك الالكترودينامي للجملة ، بالنسبة لإنسان موجود في الصندوق

متفقاً تماماً مع خبرتنا اليومية . أما إذا كان الصندوق شفافاً بعض الشيء فلا مناص من مفارقة حدوث مفعولات متقدمة .

وبعد أن قدم ويلر وفاينمان هذا البرهان على نشوء أمواج متأخرة صرفة من أمواج تتمتع بتناظر زمني ، وذلك باستخدام جواب الصندوق ، كشفا عن الموقع الذي يتسلل منه اللاتناظر الزمني . فإذا كان من المفترض في الجملة كلها أن تتصرف ، بعد كل شيء ، بشكل تناظري زمني فان معكوس نمط الأمواج يمكن أن يُستخدم ، سواءً بسواء ، لإنتاج موجة متقدمة صرفة من المنبع . ومفتاح اللاتناظر كامن في آلية الامتصاص . إذ عندما يكون الصندوق غير شفاف فان سطحه الداخلي لابد أن يمتص الأمواج التي ترد عليه ، وهذا يعني عملياً أنها تتحول إلى حرارة ، لأن الالكترونات المهتزة تصطدم بذرات الجدران وتمنحها حركة حرارية . والحرارة الناجمة تتبدد عندئذ في جدران الصندوق بموجب قانون الترموديناميك الثاني . ولكي يحصل المفعول المعاكس ، وتنشأ الأمواج المتقدمة ، لابد لذرات الصندوق بعددها الهائل من أن تتراطم بأسلوب ملائم ، أي بأسلوب يتيح لها حصراً أن تنقل حركاتها الحرارية إلى الالكترونات في الوقت المناسب بالضبط لتصبح هذه الالكترونات بمجملها مشعة لموجة مترابطة تعود إلى الجسيم المنبع ضمن الصندوق . لكن موجبات المبادىء التي أوردناها في الفصل الثالث تجعل تحقق مثل هذا الظرف عملية نادرة الحصول جداً ، وإن لم تكن مستحيلة .

وهكذا استطاع ويلر وفاينمان ، من خلال استنطاق آلية جواب الماصّ ، إلقاء كل مسؤولية اللاتناظر الزمني للاشعاع الكهرطيسي على عاتق الترموديناميك . ولكي نقدر بشكل أساسي كيفية انجاز ذلك يجب أن نلاحظ مايلي : إذا كان الصندوق غير شفاف بتاتاً ، أي بحيث لا يمكن للاشعاع أن يخرج منه إلى الفضاء المحيط ، فان فعل الحقول ضمن الصندوق يمكن أن يُستبدل به فعل مباشر عن بعد فيما بين الجسيمات المشحونة . وهذا الفعل المباشر ، لجسيم في جسيم ، ليس من النوع الآني الذي يميز نظرية نيوتن في التثاقل ، لكنه فعل مؤجل ينتشر بسرعة الضوء . وهو ، فوق ذلك ، فعل يعمل في كلا الاتجاهين ، الخلفي والأمامي ، في الزمان . وهذا الفعل ، كما رأينا ورغم بعض الغرابة التي فيه ، لا يختلف مبدئياً ، من حيث نتائجه في صندوق غير شفاف ، عن نتائج نظرية مكسويل التي تقول بأن الاضطراب ينتشر محمولاً على الحقل . على أن مزية توصيف

الالكتروديناميك بلغة التفاعل بين الجسيمات حصراً ، تنبع من أن هذه اللغة تعود بقضية اللاتناظر الزمني إلى ميدان الحركات الجسيمية ، أي الى الترموديناميك ، حيث تصبح مفهومة فهماً جيداً . ولم يعد من الضروري إذن ، بموجب هذه النظرية ، أن نعد اللاتناظر الزمني للأمواج قضية من قضايا الحقل الكهرطيسي ، إذ لا حقل هنا بالمرة .

هذا ولا يمكن أن نحمل نظرية ويلر وفاينمان على محمل الجد الا اذا كان العالم يتصرف وكأنه ضمن وعاء مغلق عديم الشفافية تماماً ، ماذا وإلا يصبح علينا أن نحل مشكلة المفعولات السلفية المزعجة (أي «السببية المتجهة نحو الخلف») . ومن المؤكد أنه لايوجد شيء كتيم (غير شفاف) جداً حول العالم في جوار مجرتنا . فالواقع أن الضوء يستطيع أن يسافر عدة مئات من ملايين السنين دون أن يصادف من المادة شيئاً يستحق الذكر . وامتصاص الاشعاع يتعلق ، في حدوثه وفي عدم حدوثه ، وقبل كل شيء بظروف العالم في المستقبل البعيد . وعلى هذا فإن التمسك بنظرية الماص يتيح لنا أن نستنبط فرضية بخصوص كيفية بلوغ العالم نهايته . اي أننا ، بمعنى ما ومن خلال السلوك الموضعي للاشعاع الكهرطيسي ، نستطيع أن نتطلع في المستقبل وأن نستشف مصير هذا الكون . وبحساب بسيط نرى ، عندئذ وبالاعتماد على ظروف نماذج فريدمان الكونية ، أن العالم صائر الى الارتصاص .

٦ - ٣ موت العالم

إن من اللافت للنظر أن معظم الناس يظنون ، بسبب وقع اللاتناظر الزمني على الفكر البشري ، أن في الماضي وقتاً بدأ فيه كل شيء ، لكن من النادر أن تخطر على بالهم إمكانية أن يوجد في المستقبل وقت ينتهي عنده كل شيء . لكن الفيزياء بطبعها ترى أن كل تطور قابل للعكس ، وأن مسألة بلوغ العالم نهاية ما تتلخص عندئذ في معرفة إذا كانت ظروف حركة العالم ، في السلم الواسع ، من نوع يتيح حصول انقلاب في مسار تطوره الراهن .

لابد ، قبل أن نبحث في طبيعة «وفاته» ، من أن نشرح الظروف التي تسوق العالم الى مثل هذه الكارثة . فإذا عدنا الى الفقرة ٥ - ٢ ، والشكل ٥ - ٥ خصوصاً ، نستطيع أن نرى ، بالاعتماد على نماذج فريدمان ، أن العالم يمكن أن يسلك في المستقبل أحد

طريقين . فهو ، في النموذجين 1 و 2 ، يواصل توسعه دون توقف ، لكن هذا التوسع يتوقف ، في النموذج 3 ، عند حد معين ثم ينقلب الى تقلص يستمر ، انطلاقاً من هذا الحد ، الى أن ينتهي بالعالم الى الانطفاء في متفرد نهائي يماثل المتفرد الذي كان منطلق التوسع . وعلى هذا فإن النموذج المحدود مكانياً محدود زمانياً أيضاً ، وهو بالفعل متناظر زمنياً . والشرط اللازم لبلوغ نقطة بدء الارتصاص يماثل في الواقع معيار نصف قطر شفارتزشلد من أجل الثقوب السوداء ، ذلك أن الارتصاص لابد أن يبدأ بمجرد بلوغ الكثافة في هذا العالم القيمة العالية المطلوبة ، ولا شيء يمكن أن يوقفه .

إن الكثافة الكتلية الحرجة اللازمة لحدوث التقلص من جديد في هذا العالم تساوي تقريباً ١٠^-٢٩ غرام في السنتيمتر المكعب ، أي مايعادل حوالي ذرة واحدة في كل ١٠٠ لتر من الفضاء . ومعلوم أن كثافة المادة المضيئة (كل النجوم وماشابهها) تساوي اليوم حوالي ١٪ من هذه القيمة . فالأمر يتوقف إذن على كمية المادة ، أو الطاقة ، الموجودة بأشكال أخرى . فالفضاء بين المجرات قد يحتوي مثلاً على كمية كبيرة من المواد ، وقد تحوي المجرات عدداً كبيراً من الأجرام المظلمة ومن الثقوب السوداء . وفوق هذا وذاك قد يكون العالم مليئاً بكمية هائلة من الأمواج الثقالية أو النترينونات ، وكلاهما ذو تفاعل مع المادة ضعيف لدرجة أن هذه الكمية ، على عظمها ، لاتقوم بأي دور ذي شأن .

إن تعيين الاسهام الطاقي ، الناجم عن هذه المنابع ، قد حظي باهتمام كبير لدى الفلكيين . لكن الصعوبات الفنية والعوامل المعقدة عديدة ، وقد تغيرت فيها الآراء مراراً ، لأسباب رصدية وفلسفية . وقد شهدت أوائل السبعينات اتجاهاً عاماً في الرأي نحو كثافة عالمية عالية ، لكن هذا الاتجاه انعكس مؤخراً بشكل حاد .

وحسم هذا الموضوع لا يتوقف فقط على القياسات الكثافية . فمعدل تباطؤ التوسع يمكن أن يقاس مباشرة من نمط حركة المجرات نفسها (تذكر أن رصد المناطق النائية في هذا العالم يعطي فكرة عما كان عليه التوسع في الماضي البعيد ، مما يتيح تقدير معدل التباطؤ) . لكن هذه القياسات تفضي الى تباطؤ أكبر من الواقع بسبب بطء التغير في سطوع المجرات . وقد يكون من الأصح أن نقول إن الجدل في أمر حدوث تقلص آخر مايزال مفتوحاً دون حسم .

وهكـذا نكون قد ناقشنا نظرية ويلر ـ فاينهان وذكرنا شرط صحتها ، وهو ضرورة الانعدام التام لشفافية وعاء العالم ، ورأينا أن هذا الشرط يتوقف على الحركة الكونية في المستقبـل البعيد . ونموذجا فريدمان 1 و 2 ، المنطويان على توسع دائم ، لايتفقان مع شرط عدم الشفـوفية إزاء الاشعـاع . أما نمـوذج عودة التقلص فيتفق تماماً مع هذا الشرط . ولما كانت الكثـافة المنخفضة دليلاً واضحاً على التوسع ، فإن التوسع العالمي المستمر لابد أن يكون دليلاً واضحاً ضد نظرية الماص .

إن ماسيحـدث للعالم عندما يبدأ تقلصه سيكون بلا شك عودة الى ظروف الكرة النـارية للانفجـار الأعـظم . وهـذه العـودة ستحصـل بالتدريج البطيء وتستغرق عدة مليارات من السنين . أما منظر العالم في السلّم الواسع ، أثناء معظم المدة التي يستغرقها التقلص ، فلن يعـاني سوى تغير طفيف بسبب طول الـوقت الـذي يستغـرقـه الضـوء للوصول من المناطق النائية . على أننا لا نستبعد على كل حال حدوث انفجار عام نحو الداخل عندما تقترب المجرات من الارتطام بعضاً ببعض ؛ ولابد أثناء التقلص من أن ترتفع درجة حرارة الاشعاع الغامر ، يعززها ضوء النجوم ، حتى تبلغ في المراحل الأخيرة قيمـة تكفي لتبخير النجوم . وعندما يشتد الانسحاق الهائل للمادة يبدأ سريعاً كل شيء بالاضطرام اضطراما عنيفا . ثم تتشكل الكرة النارية من خلال المرور بالاتجاه المعاكس عبر الحالات المرحلية التي شرحناها بمناسبة الكلام عن الانفجار الأعظم الأولي ، حتى ينتهي العالم كله الى السقوط معاً في هاوية متفرد مكاني ـ زماني . فالثقالة تؤدي إذن مهمة القابلة في ولادة العالم ومهمة الدافن حافر قبره .

أمـا الامكـانية المتاحـة الأخـرى في نماذج فريدمـان ، غير إمكـانية الارتصـاص والانـطفـاء الـلاهب ، فهي قفر من الصقيع المتجمد . فلو استمر العالم في التوسع الى الأبـد فلن يبلغ التـوازن الترموديناني الكامل أبداً . على أن الاختلال الكبير الراهن ، الذي ندين له بحياتنا والذي ينطوي على فضاء واسع بارد تنتثر فيه على غير نظام نقاط نجمية ساخنـة ، لايمكن أن يدوم الى الأبـد . وقـد يحدث أن تستنفـذ النجـوم وقودها النـووي كله وتختفي . فإمـا أن تفجر نفسـها ، واحدة بعد أخرى ، الى شظايا ، كما في المستعمـرات العمـلاقة ، وإما أن تظلم ببطء وتبرد . وربما يرتص بعضها فيشكل ثقوباً

سوداء . ولئن كانت هذه العملية بكاملها قد تستغرق المليارات من السنين ، إلا أنها لابد حادثة على المدى الزمني الطويل .

وأثناء استمرار هذا التوسع تبتعد المجرات بالتدريج ويخبو نورها حتى تصبح غير مرئية . وكل مادة منها ، مما لم تبتلعه الثقوب السوداء ، ستبرد ببطء حتى تبلغ درجة الفضاء الصقيعية المتضائلة الى الأبد . ولا ينتج عن ذلك شيء يستحق الذكر في هذا القفر الموحش المظلم البارد الخالي ، اللهم إلا أن تحدث بالصدفة كارثة مفاجئة ، كأن يتصادم نجمان نترونيان ، أو ثقبان أسودان ، فيستعيد العالم شيئاً من النشاط المحلي المؤقت ينبثق عنه إشعاع ثقالي ، أو ربما حتى تفاوت من تلك التفاوتات النادرة جداً يضيء ، من وقت لآخر ، بعض مناطق ذلك الظلام الدامس . هذا إن لم تكن تلك النهاية .

وهناك حتماً في العلم بضع تنبؤات تولِّد كآبة لا تقل عمقاً عن كآبة موت العالم الحي .

٦ ـ ٤ عوالم بلا نهاية

اقترح عدد من الكونيين تناولاً آخر لموضوع التطور الزمني لهذا العالم . ففي عام ١٩٤٦ تكهن أثنان من فيزيائيي النجوم ، البريطانيان بوندي H.Bondi وغولد T.Gold ، بأن العالم إذا بدا مماثلاً لنفسه (في السلّم الواسع) ، من موضع لآخر ، فربما سيظل على حاله هذه من وقت لآخر . أي أن العالم لن يتغير عندئذ من حيث مجمله أبداً وبتاتاً . وأنه طبعاً يجب أن يستمر توسعه ، وبالمعدل ذاته . والتوسع يؤدي بالطبع الى تناقص كثافة عدد المجرات في العالم . وللتعويض عن تناقص الكثافة أثناء التوسع يفترض بوندي وغولد أن مجرات جديدة تتشكل باستمرار لملء «الفجوات» التي تخلفها المجرات المنسحبة . أما المادة التي تتشكل منها هذه المجرات فتتخلق باستمرارأثناء توسع العالم . فليس في هذا النموذج انفجار أعظم خالق ، والمادة تنبثق في هذا العالم طوال الزمن . فالسلوك الاجمالي لهذا العالم اللا متغير ليس إذن سكونياً ، بل هو مستديم الحال ، ذو نجوم إفرادية ومجرات تتطور في حلقات حياتية زمنية ، فتزول مادتها ثم تعود فتتخلق من جديد لتزيد في عدد النجوم الشابة . وعلى هذا ، إذا كان العالم مستديماً على هذه الحال

فليس له بدء ولا نهاية .

على أن السمة التي تثير تساؤلاً بدهياً ، في نظرية الحال المستديمة هذه ، هي الآلية المتبعة في الانبثاق الدائم للمادة في العالم . ولما كان تخلق الجسيمات الكمومي من الحقل الثقالي مهمل الشأن في مثل هذه الظروف فلابد من مبدأ آخر جديد . وهذا ماابتدعه هويل من خلال فكرة حقل من نوع جديد أسماه حقل الخلق ، أو الحقل خ . وهذا الحقل مزوَّد بطاقة سالبة ، مما يجعل خلق الذرة (وقد اتخذ الهدروجين لبساطته) بالاقتران مع المادة مصحوباً بتعزيز طاقة الحقل السالبة . وبذلك يظل انحفاظ الطاقة قائماً ، وتغدو العملية بمجملها متفقة مع نظرية النسبية العامة ، لكنها لن تكون بالطبع متفقة مع كل قوانين انحفاظ «العلامات» في فيزياء الجسيمات الأولية . بيد أن معدل الخلق الناجم عنها ضئيل حقيقة ، فهو من رتبة ذرة واحدة في السنة في حيز من رتبة حجم مدينة صغيرة . ولئن كان من المتعذر عملياً اكتشافه إلا أنه كاف للتعويض عن تناقص الكثافة الناجم عن التوسع الكوني .

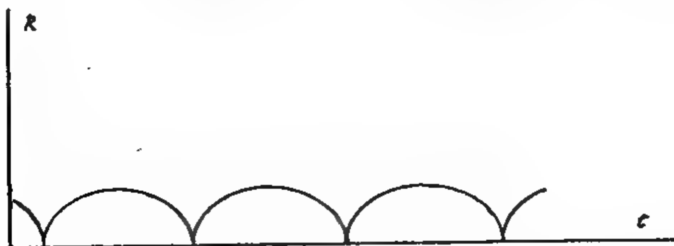
وقد جرى تطوير هذه النظرية ، في مراحلها الأخيرة وبالتفصيل الواسع ، على أيدي هويل ونارليكار ؛ وحظيت بشعبية كبيرة لسنوات عديدة . بيد أن ماحصل في أواسط الستينات ، من اكتشافات ثورية جلية أولاً ومن وجود اشعاع حراري غامر في هذا الكون ثانياً وأخيراً ، كان مستنداً متيناً للاعتقاد بأن العالم قد مر بحالة كثافة حرارية كبيرة استغرقت بضعة مليارات من السنين ، وأنه بالتالي لا يمكن أن يكون في حال مستديمة . وعلى هذا الاساس تم اليوم التخلي عن هذه النظرية التي أثارت بعض الجدل .

على أن فكرة عالم دون بدء ولا نهاية فكرة جذابة جداً من الناحية الفلسفية . وفي سبيل انقاذ المزايا الفلسفية لنظرية الحال المستديمة ، ودون التخلي عن التوفيق الذي أصابه نموذج الانفجار الأعظم ، أمكن استنباط نموذج عُرف باسم العالم النواس . وهو يعتمد على نموذج فريدمان في عودة التقلص ويفترض فوق ذلك أن العالم ينجو ، في كلا طرفيه الزمنيين ، من أن يؤول الى متفرد (وقد ذكرنا في الفقرة ٥ ـ ٥ عدداً من الطرق التي يمكن أن يتم بها ذلك) . فإذا كان ذلك حقاً فإن العالم في نهاية دورة توسعه وتقلصه ، سيبلغ حتماً كثافة عالية جداً «يثب» عندها فجأة الى بدء دورة جديدة تشبه سابقتها ،

وهكذا دواليك (انظر الشكل ٦ ـ ٣) . ومثل هذا العالم سيكون دون بدء ولا نهاية ، كما في نظرية الحال المستديمة . على أن العنف الذي يسود أطوار الكثافة العالية لابد أن يدمر كل بنية كانت في الطور السابق وكل المعلومات عنه ، وعلى هذا النمط تتكرر الدورات المتوالية .

ويمكن للمرء أن يتساءل عن كيفية نجاة العالم من بلوغ التوازن الترموديناميي . بيد أن ذلك يمكن ان يفهم من سلوك التجربة المخبرية المشروحة في الشكل ٦ ـ ٤ الذي يمثل غازاً محصوراً في اسطوانة تحت مكبس ثقيل . فإذا ضغطنا على المكبس بقوة ، بدءاً من وضع توازنه ، ثم تركناه وشأنه نرى أنه يقفز بسرعة نحو الاعلى بسبب ازدياد ضغط الغاز المحصور عليه . ثم نرى أن المكبس ، بفعل عطالته ، يتجاوز وضع التوازن السابق ، مما يخفف ضغط الغاز ، فيعود المكبس الى الهبوط ضاغطاً الغاز من جديد وهكذا دواليك ينوس المكبس صعوداً وهبوطاً . أما الغاز فينوس توسعاً وتقلصاً على غرار حركة العالم النائس . لكن المكبس ، ولأسباب عديدة ، لا يستمر في نوسانه الى الأبد . ففي كل صعود يستجيب الغاز بتوسع متأخر قليلاً عن حركة المكبس . ومن شأن هذا التأخر أن يبتعد بالغاز قليلاً عن حالة التوازن مع بقية الجملة . وينتج من ذلك أن

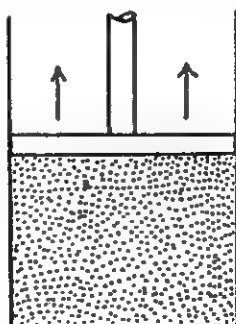
شكل ٦ ـ ٣ . فكرة عالم جديدة . إذا نجا العالم المتقلص من أن يؤول الى متفرد فإنه (بطريقة ما) سينزو ليبدأ توسعاً آخر . ومفعول «الاحتكاك» الكوني يولد ، على شكل حرارة ، انتروبية تتزايد بلا نهاية دورة بعد دورة . ولتحاشي ذلك يرى بعض الكونيين أن العالم «ينفعل من جديد» عند بدء كل دورة ، متخذاً «شكلاً جديداً» يمكن أن تتغير فيه الفيزياء كلها ، لا الأنتروبية فحسب . ومعظم هذه الأشكال الجديدة قليلة الملاءمة للحياة ، لحياة لاتصنع علماء كون إلا في دورات تشبه الدورة التي نحن فيها .



انتروبية الغاز تزداد قليلاً في كل دورة وهي تحاول إسترجاع حالة التوازن . وازدياد الأنتروبية هذا يظهر كازدياد في درجة حرارة الغاز الذي يسخن على حساب طاقة المكبس . وعلى هذا فإن حركة المكبس تتخامد بالتدريج حتى تبلغ الجملة اتفاقاً حالة سكون يكون فيها الغاز أسخن قليلاً والانتروبية أكبر . فإن كان هناك آلة تحرك المكبس فإن النوسات تستمر حتى تستهلك كل طاقة الآلة ، وعندها يمكن أن تتوقف الحركة .

أما في الحالة الكونية فإن الأنتروبية المتولدة عن تأخر التوسع المذكور آنفاً صغيرة جداً . فمعظم الأنتروبية يتولد عن ضوء النجوم ، كما ذكرنا في الفقرة ٦ ـ ١ . لكن المبدأ العام واحد على كل حال ، ويبدو للوهلة الأولى أن الحركة الكونية تتبأطا حتى التوقف مع استمرار تزايد انتروبية العالم . بيد أن الأمر ليس كذلك وضوحاً ، لأن التوازن لا يمكن أن يحدث أبداً في عالم يتثاقل دوماً على نفسه ـ فهو سيعاني ارتصاصاً ذاتياً لا مناص منه . ذلك أن الحقل الثقالي منبع طاقة لا ينضب أبداً ، مما يجعل حركة النوسان أبدية . والواقع أن الحسابات تدل فعلاً على أن سعة النوسات تنمو باستمرار .

شكل ٦ ـ ٤ . تمثيل للعالم الواثب . اذا ضغطنا المكبس وتركناه فسيثب صعوداً وهبوطاً ، وسيعاني الغاز سلسلة من التوسعات والتقلصات ، كالعالم الممثل في الشكل ٦ ـ ٣ . على أن هذا النوسان ، اذا لم يستمد طاقة من آلة خارجية ، سيتوقف اتفاقاً عندما يتم تحول كل حركة المكبس المنظمة الى حركة (حرارة) غازية منظمة ، طبقاً لقانون تزايد الأنتروبية . والأنتروبية لا يمكن أن تزداد بعد توقف المكبس . لكن هذا لا يحدث في الحالة الكونية ، لأن الثقالة تغذي النوسان دون انقطاع ، والأنتروبية (الحرارة) تتزايد دون حدود .



إذا كانت انتروبية العالم تتزايد من دورة للأخرى ، فمن الواضح أننا لا نعيش في عالم ناشىء من النوع الذي وصفناه . هذا وإن معظم الانتروبية في هذا العالم هي على شكل إشعاع غامر ، وهو ضعيف جداً . والواقع أن الأنتروبية المتولدة عن إصدار ضوء النجوم ، في دورة واحدة سالفة فقط ، يمكن أن تكفي لتزويد كل هذا الاشعاع الغامر . فنحن نعيش إذن على الأغلب في دورة النوسان الثانية .

ويذهب بعض المختصين الى القول بأن الأنتروبية لا تنجو من طور الكثافة العالية بين دورتـين ، لأن كل دورة جديدة تنـطلق من «انفعـال» جديد . فإذا كانت قوانـين الترموديناميك تُنتهك في نهاية كل دورة ، فقد تُنتهك كل قوانين الفيزياء أيضاً (ومع ذلك يفترض أن النسبية العامة ، رغم كونها أقل الجميع براهين، تظل صامدة) . وقد يبالغون في هذه الفلسفة حتى يفترضوا أن الثوابت الكونية نفسها ، كشحنة الالكترون وثابت بلانك ، «تنفعل» لدى بدء كل دورة . فاذا لم ينج شيء من دورة لأخرى تكون عندئذ كل دورة عالماً مستقلاً فيزيائياً بذاته ، كما يمكن اعتبار كل الدورات مجموعة غير منتهية من عوالم موجودة معاً . وقد تكون ، في بعض هذه العوالم ، قوانين وثوابت تطابق تلك التي تخصنا وتتيح تشكل حياة كهذه التي نعيشها . لكن معظمها لابد أن يكون مختلفاً عن ذلك جذرياً ويستحيل ظهور حياة فيه . أما السبب في أننا ندرك نوع العالم الذي نرصده فكامن في البيولوجيا . وهناك ، من بين كل النماذج الكونية الممكنة ، عدد صغير فقط من العوالم التي تتيح ظهور كونيين يتحرونها ويتساءلون عن كنهها . وهذا الانقلاب الغريب الذي يوجب استخدام البيولوجيا لتفسير الفيزياء ، وحتى لتفسير علم الكون ، يبدو محيراً للقارىء ، وهذا القارىء سيصادف من هذه التكهنات ، عدداً أكبر في الفصل السابع . لكن هذه الفكرة ذات أساس فلسفي صرف ، وليست هي نظرية فيزيائية ، ولايمكن وضعها على محك التجربة والرصد .

٦ ـ ٥ النظام والفوضى في العالم

لقد تتبعنا ، في الفقرة ٦ ـ ١ ، أصل الاختلال في العالم حتى وصلنا الى التغير الفجائي في شكل توازن المادة إبان توسع الكرة النارية الأولية وتبردها . فنحن نجده قلقاً

لسبب جوهري هو أننا نعيش في عالم متحرك . فمجمل حركة العالم يمكن أن نعتبره ، بمعنى ما ، نوعاً من التدخل «الخارجي» في الجمل الترموديناميةالمحلية المكونة من المادة والاشعاع . وقد شرحنا ، في الفصل الثالث وبعناية ، أن مثل هذا التدخل ، الذي يشكل شرطاً لازماً لحدوث اللاتناظر الزمني ، لايكفي بحد ذاته لتعيين هذا اللاتناظر في الزمان . ولابد أيضاً من افتراض حركات عشوائية على الصعيد المجهري ، أي مايسمى عادة بالفوضى الجزيئية . فإذا نظرنا الى العالم بمجمله على أساس أنه جملة فرعية عملاقة ، فإن محاولة ايجاد تفسير كوني للفوضى الجزيئية تصبح معضلة محيرة .

لقد أوردنا فيما سبق تفسيراً لذلك يعتمد على اقتراح بولتزمان بأننا نعيش حالة قريبة من الحالة النهائية لانحراف (تفاوت) كوني عملاق عن حالة التوازن ، مما نستطيع فيه أن نثق ثقة شبه كاملة بصحة فرضية الفوضى الجزيئية . لكن هذا لايتفق مع مانعرفه عن التطور الماضي للعالم المتوسع .

وهناك إمكانية تفسير آخر (قد لا تقل غرابة عن تلك ، رغم أنها أحرزت انتشاراً أوسع بكثير) يعتمد ، لا على وجود عالم واحد فقط ، بل على وجود مجموعة من العوالم ، قد تكون لا متناهية العدد . وهذه الامكانية يمكن أن تعالج على أساس أنها سلسلة دورات اهتزازية متعاقبة ، على غرار ماذكرنا في الفقرة السابقة ، أو على صعيد ميكانيك الكم الذي يقول تفسير لا مألوف لنظريته بامكانية كل العوالم الكمومية المتوقعة أن توجد معاً على شكل سلاسل هائلة العدد من عوالم متوازية ! ومهما يكن من أمر فإن أية مجموعة عوالم يمكن أن تتيح حصول كل النماذج الحركية المجهرية البدئية الممكنة . وعلى هذا الأساس يكون العالم الذي نرصده ، وبكل بساطة ، عضواً نوعياً من المجموعة اتفق له أن يبرز من التشكيلة كلها بمحض العشوائية . أما السلوك «المعجزة» (كانفصال غازين في وعاء واحد) فهو جزء لامتناه في الصغر من مجموعة التشكيلات .

قد ينظر بعض الناس بعين الشك الى فكرة مجموعة من العوالم ، ويفضلون أن يقولوا ببساطة بأن سبب انطلاق العالم من حركات مجهرية عشوائية يعود الى حصول صنعه بهذا الأسلوب . ومهما كانت وجهة النظر التي نعتمدها فمن الواضح أن العالم اللامتناظر زمنياً لايتطلب أية ظروف بدئية خاصة جداً . فهو يبدو منطوياً على عملية خلق

حصلت ، على الصعيد المجهري ، بصفة عشوائية عامة جداً . وهذه العشوائية البدئية هي بالضبط مايمكن للمرء أن يتوقعه من متفرد يستعصي ، كما رأينا في الفصل ٥ ـ ٣ ، على كل نبؤة .

ومن نتائج فرضية فوضوية الحركات المجهرية البدئية نذكر أن التأثيرات التي تصل الى الأرض من شتى نواحي السماء مستقلة تماماً ولا صلة فيما بينها . فالأمواج الكهرطيسية مثلاً تضرب الأرض باستمرار على شكل ضوء آت من النجوم وأشعة سينية وأشعة غاماوية وكذلك ، وهذا أهمها ، الاشعاع الحراري الغامر ذو السخونة المنخفضة الذي خلفه الانفجار الأعظم نفسه على مايظهر . والطبيعة الحرارية لهذا الاشعاع هي بالضبط السبب في أنه لا يحمل أية معلومات عن الكرة النارية البدئية . فليس ثمة رسائل مترابطة تصل الأرض ضمن أمواج كروية متقلصة . وهذا يعود الى القول بانتفاء أي إشعاع كهرطيسي متقدم ، لأن فرضية عشوائية الحركات الموجية البدئية تنفي التضافر المجهري الخاص جداً اللازم لتوليد نمط أمواج متقاربة . (وإذا اعتمدنا ، بدلاً من ذلك ، على نظرية ويلر ـ فاينمان في الماص ، فإن هذه الخطوة لاتعود ضرورية طبعاً . فالطبيعة التأخرية للاشعاع تعوض عن الخواص الترموديناميه للمادة الماصة) .

وهناك تصور مختلف تماماً ، للنظام والفوضى في العالم ، ناقشه عدد من الكونيين نخص بالذكر منهم توماس غولد وجون ويلر .

هب أن الاختلاط البدئي ينطوي على خطة ، أي على نموذج خفي من الحركات يحوي ، رغم عدم أهميته في بدء الانفجار الأعظم ، بذور عجائب مستقبلية . فقد لا يكون ماانطوي عليه ولادة العالم النارية من حركات مجهرية عشوائية سوى مظهر في عيوننا العاجزة عن كشف التضافر الخفي بين الأعدد التي لا تحصى من الجسيمات التي تتحرك كلها بانماط شتى لتصب ، عن طريق غير مباشر ، في نهاية مشتركة مترابطة . فهل يمكن أن يوجد في العالم نظام خفي «منطو» في ثنايا مكونات تتحرك ظاهرياً بشكل عشوائي ؟

لقد أوضح الفيزيائي البريطاني بوم D.Bohm بمهارة كيف يمكن أن نعجز عن كشف النظام «المنطوي» في ظاهرة الفوضى . خذ جرة مليئة بدبس السكر وأمسك بملعقة آلية للتحريك . ضع قبل التحريك قطرة من الحبر الأسود في مكان ما في الدبس . سترى أثناء التحريك الداثري أن القطرة تنجر على شكل خيوط بحركة

الملعقة . وبعد عدد كبير من دورات الملعقة ترى أن الخيوط قد دقت والتفت لدرجة يبدو فيها الدبس لبرهة خليطاً ذا لون أسمر نسيق . ومع ذلك فإن القطرة المنطوية في ثنايا الدبس ليست ذا توزع عشوائي بتاتاً . ورغم أن البنية الخيطية معقدة جداً إلا أنها ذات نظام خفي ، أي أن النظام لم يزُل . وهذا النظام يمكن أن يتجلى بشكل مدهش إذا أعيد تدوير الملعقة بالاتجاه المعاكس للسابق تماماً ، فعندئذ تعود الخيوط أدراجها لتلتم شيئاً فشيئاً على شكل قطرة من جديد ، ويعود النظام الى الظهور بشكل واضح ! ربما كان العالم على غرار هذا ، أي ذا نظام منطو في ظاهر الفوضى ثم ينبثق في وقت ما من المستقبل .

ذلك هو الوضع الذي تصوره غولد . ففي تلك الفترة من عمر العالم لم تحدث أية معجزة . كانت الجمل الفرعية تتشكل عشوائياً وتتزايد أنتروبيتها بالطريقة المعتادة . فتظهر الفوضى أكثر من النظام في العالم ـ تصدأ السيارات ويموت البشر ويذوب الجليد . ثم يحل محلها سيارات أخرى وبشر وجليد ، ولكن فقط على حساب طاقة تتشتت وانتروبية تتزايد في العالم الأوسع ، فتزداد الفوضى الاجمالية . ولكن ماذا يحصل لو انعكس في موعد مستقبلي هذا النمط من اللاتناظر ؟ إن مثل هذا الوضع الغريب ممكن بلا شك . فرغم أن الغالبية العظمى للحركات المجهرية في الانفجار الأعظم تتسبب في نشوء عالم ذي انتروبية صافية متزايدة ، فقد تنتج بالفعل ضمن تزايد الأنتروبية البدئي زمرة حركات خاصة جداً جداً متبوعة بتناقص حتمي . ولكي يحصل هذا يجب أن لاتكون مكونات العالم المجهرية قد انطلقت من ظرف عشوائي حقاً ، بل إن كل جسيم ، وكل موجة كهرطيسية ، يجب أن تنطلق على طول مسار مختار بعناية كي يصل العالم الى هذا التطور المستقبلي الخاص جداً .

لنتأمل فيما يمكن أن يحدث في النصف الثاني لمثل هذا العالم العجيب . فبدلاً من نجوم يتحول فيها الهدروجين الى هليوم ويصدر عنها اشعاع ، سيأتي الاشعاع من أعماق الفضاء متكيفاً بعناية كي يسقط على سطوح النجوم الساخنة . وهناك لابد أن يرشح عبر طبقات النجم ويتراكب تدريجياً ليشكل أشعة غاما حتى يصل كل شعاع غاماوي الى قلب النجم في الوقت المناسب بالضبط ليمزق ذرات الهليوم الى مكوناتها القلقة . وفي هذا الظرف تظهر السطوح الساخنة عاتمة والسطوح الباردة متقدة لامعة . وبدلاً من أن

تظهر السماء مظلمة تغدو وضيئة لأن أعماق الفضاء الباردة تعطي طاقتها المتبقية الى النجوم التي تبدو عندئذ بصورة نقاط سوداء على أرضية ساطعة منهمكة في نشر الطاقة .

وعلى سطح كوكب مثل الأرض سيسير كل شيء نحو الوراء . ستصعد الأنهار الى منابعها ، وستقفز قطرات المطر الى السماء وتختفي ، وستتشكل القصور على الشاطىء بفعل الرياح والبحر ، وستتجمع المادة الخاملة بشكل تلقائي لتصبح كائنات بشرية هرمة مريضة تتطور نحو الشباب والصحة حتى تُنهي أيامها مختفية في أرحام أمهاتها !

إن من الغريب أن تبدو هذه الأمور مضحكة ، وما ذلك إلا لأنها ببساطة وصف لعالمنا الحاضر صيغ بلغة زمن معكوس الاتجاه . لكن حدوثها ليس أكثر لفتا للنظر مما تعودنا عليه في حاضرنا القائم ، لأن الفرق بين الوصفين فرق لغوي صرف يخص مدلول الكلمات ، لافرق فيزيائي . ذلك أن الكائن البشري المخلوق في عالم معكوس الزمن سيكون ذا مخ معكوس وحواس معكوسة وعلى الأرجح ذهن معكوس . فهو سيتذكر المستقبل وسيتنبأ بالماضي ، مما يجعل لكلماته مدلولات غير التي نعرفها ، وللغته مضامين غير التي نفهمها . وعلى هذا فإن عالمه ، بالنسبة له ، لن يختلف في شيء عن عالمنا بالنسبة لنا ـ أي أنه لن يجد أية غرابة في مانراه نحن غريباً .

فاللافت للنظر إذن هو أن ينقلب عالمنا ذو الزمن «المتقدم» ليصبح عالماً ذا زمن «راجع» (أو العكس بالعكس ، لأن الظرفين متناظران تماماً) . لكن مثل هذا الانقلاب يتطلب ، كما رأينا ، تضافراً شاذاً بين أعداد لا تحصى من الذرات .

عندما طرح توماس غولد هذه الفكرة لأول مرة قال بأنها ستحدث في أثناء عودة التقلص في نموذج فريدمان . ذلك أن التوسع الكوني نفسه ينعكس في هذا النموذج ، مما يجعل نصفي الدورة يبدوان كليهما لقاطنيهما متطابقين . ففي كل منهما علم ترموديناميك «نظامي» وأمواج كهرطيسية متقدمة ، كما في النصف المتوسع الذي نحن فيه . وكل مجموعة من مجموعتي القاطنين سترى أن نصف العالم الذي تختبره هو النصف «الأول» ـ أو القسم المتوسع ـ وأن النصف «الأخير» هو طور التقلص وأن قاطنيه يرون كل شيء فيه يسير «نحو الوراء» لأن علم الترموديناميك والتناظرات الأخرى معكوسة . بيد أن أيا من المجموعتين لا يحق لها ، بالطبع ، أن تعتبر أن اتجاه الزمن فيها هو

الأفضل . كما أن تسمية أحد الانفجارين الأعظمين بأنه «البدء» والآخر «النهاية» عملية مغلوطة . فكلاهما ، بمعنى ما ، «بدء» بالنسبة للآخر . ونحن ، مثلاً ، لانستطيع أن نعلم في أي نصف من العالم نعيش الآن .

من المؤكد أن مانقوله هنا نابع من نموذج عالم ذي تناظر تام ولكنْ : هل تنسجم هذه الامكانية مع مانعرفه عن الجمل الفيزيائية ؟ إن الأسباب ، في عالم ذي تناظر زمني ، يمكن أن تأتي من المستقبل ومن الماضي على حد سواء ، إذ يمكن أن تحدث الأشياء الآن لأن شيئاً ما ، بعد ملايين السنين ، يقضي بحدوثها ! فضوء النجوم الصادر عن «النصف الآخر» من العالم ، في مستقبلنا ، يمكن أن يصل الينا الآن ، لكنه «راجعاً» أدراج الزمان وبادياً على شكل إشعاع متقدم (مسبق) بدلاً من إشعاع متأخر . ونحن لانستطيع أبداً أن نرى نجوم المستقبل هذه لأن نورها ، بدلاً من أن يسقط على عيوننا ويهيج حاسة البصر ، سيفعل العكس بالضبط . أي أن عيوننا ، عندما تنظر الى مثل هذا النجم ، ستصدر نوراً يذهب إليه ، بدلاً من أن تستقبل نوراً منه . ونحن لا ندري بوضوح اذا كنا سنشعر بمثل هذه الظاهرة أم لا .

ونحن لسنا عاجزين فقط عن رؤية هذا العالم المعكوس في مستقبلنا ، بل وعاجزون أيضاً عن الاتصال بقاطنية . ومردّ ذلك أنهم حتماً يعيشون ويفكرون ويستنتجون «نحو الوراء» بالنسبة لنا . وإن مايشكل عندنا معلومة من المعلومات يظهر عندهم كالانتروبية .

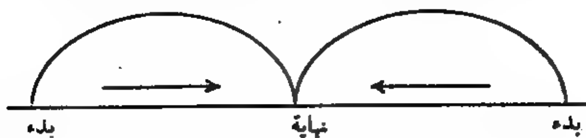
إن واقع أن يكون الاشعاع قادراً على الانتقال من أحد نصفي العالم الى الآخر يكاد ينفي حصول الانقلاب بشكل مفاجىء . وقد فكر جون ويلر باعتكاس تدريجي - «انقلاب التيار» - يبدأ بتباطؤ العمليات اللا متناظرة زمنياً حتى تتوقف ثم تنطلق راجعة الى الوراء . فاذا كان ذلك صحيحاً فقد يكون بالمستطاع تمييز إشارات ولو ضعيفة تدل على أن التيار سينقلب في وقت ما من المستقبل البعيد . وفضلاً عن ذلك فقد أُخذت هذه الفكرة بما يكفي من الجدية لانجاز تجربة واحدة على الأقل نحاول بواسطتها كشف مثل هذه الاشارات الضعيفة في سلوك الاشعاع . وقد هدفت هذه التجربة (التي أخفقت في كشف انقلاب التيار) الى البحث عن أمواج كهرطيسية مكرونية آتية من المستقبل .

إن العـالم المعكـوس زمنياً فكرة ساحرة من غرائب الفكر البشري نابعة من خيال الكونيين الخصب . لكنها قد لا تستحق أن نحملها على محل الجد أكثر من اللازم . ومع ذلـك فإن جواز أن تستـطيع الأمـور الانكفاء على مجراها الزمني يشجع على التفكير بأن الزمن نفسه قد يكون دورياً . ونحن قد افترضنا حتى الآن ، في مناقشاتنا ، أن توبولوجية الزمان من توبولوجية الخط المستقيم وأنه ينطوي على توال للحوادث متميز (بصرف النظر عن اتجاه هذا التوالي) . ولكن هب أن توبولوجية الزمن دائرية ـ أي منتهية ومغلقة ، على غرار الفضـاء في نموذج فريدمان العائد الى التقلص . إن مثل هذه التوبولوجية تنطوي حتماً على عالم معكوس الزمن .

إن فكـرة الكـون الـدوري قديمة قدم أرسطو على الأقل . وفي السنوات الأخيرة قدمت نظرية النسبية العـامـة عدداً من الظروف تبدو فيها مستقبلات الأمور متصلة في نهاياتها بمواضيها . ولم يكن في يوم من الأيام المعنى الفيزيائي لمثل هذه الظروف واضحاً تماماً ، لكن الانعكـاسـات الفلسفية لمثـل هذه الامكـانيات تثير قلقاً عميقاً . فحرية الاختيار الشخصي لا يمكن أن توجد في عالم مغلق زمنياً ، أي أن ظرف الجملة لا يمكن تغييره بالارادة ، لأن مستقبله هو أيضاً ماضيه ، وبذلك يكون ظرفها الحاضر متوقفاً على سلوكها المستقبلي ، ذلك الذي نحاول تغييره !

إذا كان هذا النـوع من العـالم معقـداً بما فيه الكفـاية ، أي ذا عدد كبـير من التفاعلات المتنوعة ، فمن المحتمل أن لانستطيع فرض أي قيد من مثل هذه القيود على سلوك الجمـل الفيزيائية . فقد يحتاج طبعاً الى أن يكون عالماً ذا تناظر زمني ، مما يجعله قادراً على «الـرجـوع أدراجـه» الى ظرف بدئه . وإذا كان نموذج غولد ينطوي على عدد كاف من التفاعلات المعقدة التي تحتم خصائص بارزة ، فمن المشكوك أن لا نلاحظ هذه الخصائص . وقد يكون من الأجدر أن نفترض وجود دورتين من التوسع والتقلص (شكل) ينحـو الـلاتنـاظـر الزمني في إحداهما أحد الاتجاهين وينحو في الأخرى النحو المعـاكس . فلا «بـدء» لمثـل هذا العـالم ولا «نهاية» . ولكن لنفـترض أننا «ننطلق» من انفجارنا الخاص الأعظم . إن عالمنا ، وهو الآن في توسع ، سيصل الى حجم أعظمي

شكل ٦ ـ ٥ . عالم ينعكس زمنياً . العمليات الفيزيائية تنحو اتجاهاً واحداً في إحدى الدورتين والاتجاه المضاد في الدورة الأخرى . الزمن مغلق على شكل حلقة .



ومن ثم يعود الى التقلص حتى انفجار نهائي تنتفي فيه كل بنية وكل معلومة . ويعود محتواه المادي الى الظهور في دورة جديدة من التوسع والتقلص تنطوي على لا تناظر زمني في الاتجاه المعاكس ـ أي أن الميقاتيات تسير نحو الوراء بالنسبة لنا . وفي «نهاية» هذه الدورة المعكوسة الزمن يحصل انفجار أعظم آخر لا يختلف في شيء عن الانفجار المذكور الأول في ماضينا الخاص . ولايمكن أن يصل الى الجزء الخاص بنا من العالم أي أثر من الجزء الآخر المعكوس الزمن ، لكن ضوء النجوم المتراكم لابد أن يظهر في الانفجار الأعظم كاشعاع حاضر ظاهرياً في مانسميه عادة «خلق» العالم . وهناك حسابات ساذجة توحي بأن هذا الاشعاع قد أسهم آنئذ في تكوين حرارة قريبة من ثلاث درجات مطلقة .

٧ الجنس البشري في هذا الكون

٧ ـ ١ وقع مفاهيم المكان ـ الزمان على المجتمع

إن الانسان حيوان اجتماعي أليف ، ولا يشذ العلميون عن ذلك . ويتخذ نمو النظريات العلمية وتطورها مكاناً ضمن إطار نظام اجتماعي وثقافي ينطوي على مركبات أخلاقية ودينية واقتصادية وسياسية . والأساس الفكري للنماذج العلمية للمكان وللزمان وللعالم تتأثر حتماً بالصورة المسبقة لموقع الجنس البشري من هذا الكون .

وفي مقابل ذلك يؤثر في المجتمع التقدم التجريبي والنظري الذي يحرزه العلم في فهم المكان ـ الزمان وفي معرفة الكون ، على غرار كل أشكال النشاط الفكري البشري . ولم يتم دوماً استيعاب كل أوجه هذا التقدم بشكل متساو في تيار المعرفة الرئيسي . فمضمونات نماذج العالم الجديدة بدت في بعض الأحيان ذات طعم غير مستساغ لدرجة أن لقيت من جمهور التقليديين مقاومة شديدة بلغت العنف أحياناً ، على شاكلة ما لقيته الثورة الكوبرنيقية .

ومن تقاليد الناس أن يستعينوا بالدين على الاجابة عن الأسئلة التي تخص بنية العالم وتطوره ، في مخطط عام يعتمد على الخلق والقدر . وكثيراً ما دخلت الاكتشافات العلمية في صراع مع العقائد الدينية وتعرض العلم لهجوم اتخذ شتى الأشكال . وقد تركز انتقاد التفسير العلمي لهذه النتائج الأساسية على أنها مجرد محاولات ، في حين أن الدين إيمان وعقيدة ، وأن التفسير الديني بالتالي غير خاضع للتطور في ضوء التجربة . أما العلم فهو معرفة اختبارية في نهاية المطاف ، وهو بذلك يعدِّل مواقفه على أرض رملية من نتائج التجربة والملاحظة ، فلا يُعتد به إلا من خلال فائدته . على أن هذه الناحية ، المتمثلة في اعادة تنظيم الآراء العلمية باستمرار ، ليست نقطة ضعف . بل هي ، على العكس من ذلك ، موطن قوة . فالعلم ، كالجنس البشري ، يتطور نحو شكل أكثر تعقيداً رغم أنه أعظم سلطاناً .

والواقع أن من النادر (في الفيزياء على الأقل) أن تجد نظرية مقبولة عموماً وتكون عملياً خاطئة بالمعنى الحرفي لهذه الصفة . فميكانيك نيوتن ، بنموذج مكانه وزمانه ، قد خدم البشرية طوال مئتي عام وأكثر ، ومازال يخدمها حتى اليوم . لقد كان نيوتن على خطأ ولئن كانت نظريته قد علت عليها نظريتا النسبية والكم فليس ذلك سوى دلالة على أن حدود نظرية نيوتن أصبحت معروفة اليوم . فكلتا النظريتين الجديدتين تحويان ميكانيك نيوتن في المستوى التقريبي منهما ، وهو تقريب جيد جداً في الوقائع اليومية في هذا العالم . إذ لا يخطر على بال إنسان أن يستخدم النسبية العامة لتعيين مسار الطيارة .

إن العلم يتطور نحو الأحسن مع تحسن التوصيف الرياضي للطبيعة . والمجتمع يعكس هذا التطور في تغير المتطلعات الذي تجلبه نظريات المكان والزمان والكون على موقع الجنس البشري في هذا العالم . وقد يكون الوقع الاجتماعي لهذا التطور أعظم سبب تتذرع به البشرية لمواصلة الأبحاث في هذه الشئون . فقد ظل المجتمع آلاف السنين معتمداً على الدين ، ولم يجد في أثناء هذا الزمن كله أجوبة مرضية شاملة عن المسائل الأساسية التي تنطرح بخصوص هذا العالم . وكان أن تولدت حروب وأحقاد واضطهادات عندما راحت مجموعات دينية تحاول فرض عقائدها على مجموعات أخرى . وفي مقابل ذلك وُجد ، لسنوات قليلة جداً ، مجتمع يعتمد على العلم . وفي ذلك الوقت أجيب بهدوء عن العديد من الأسئلة الملحة التي كان يفكر فيها أنصار الدين طويلاً . ولم ينشأ عن ذلك حرب ولا أحقاد ولا اضطهاد فيما بين أنصار الآراء العلمية ، لأن العلم لا يتعامل مع العقائد بل مع الوقائع . فنموذج العالم لا يتطلب إيماناً ، بل أرصاداً فلكية . فاذا اتضح خطؤه فهو خطأ .

لقد شهدت السنوات الأخيرة تدهوراً في الثقة بالعلم وبالتفسير العلمي للطبيعة . والتدهور المصاحب الذي أصاب الدين التقليدي نجم عن عودة مجموعة من العقائد الإرثية برزت بمظاهر عديدة منفرة . فقد عادت الخرافة لتحل محل العقل . وتعددت «الديانات» الجديدة التي هتكت المفاهيم العلمية المتناسقة ودمجتها معاً في مسخ علمي مكذوب خرافي . وقد شهد العالم الغربي انبعاث الاهتمام بالشعوذة والصحون الطائرة واستحضار الأرواح . وباستغلال الميزات الأصيلة لبعض أنواع الظواهر تخلى كهان هذه

الديانات عن تفسيرها المنطقي وأضافوا الى خرافتهم الخاصة خليطاً هجيناً من الأفكار . ثم قذفوا هذه الجملة العقائدية المفككة في وجه العلم الحقيقي الذي انتهكته أفكارها .

إن الخروج عن الالتزام العلمي والعودة الى شعوذات القرون الوسطى ناجمان بلا شك جزئياً عن العواقب التكنولوجية . فقد أدى ، في ذهن الكثيرين ، الاختلاط بين العلم والتكنولوجيا الى نزوة ضد العلم بسبب مساوىء التكنولوجيا . فالتلوث والحرب النووية وهندسة الوراثة والتحكم بأفكار الناس ليست كلها سوى نماذج عن الاستخدام السيء للعلم على شكل تكنولوجيا . كما أن النزعة الاستهلاكية للرأسمالية ، وهاجس الشعوب التي تعيش في عالم يتحكم به كبس الأزرار ، والأبنية التي تناطح السحاب ، ونهب خيرات هذا الكوكب في صناعة نهمة للطاقة ، أسهمت كلها في تنفير الناس من مزايا العلم . ومع ذلك ، فمن العجيب أن هذا المجتمع البشري نفسه ، الذي تستبد به نزعات الاستغلال الرخيص ، هو الذي يشجب كل أشكال البحث العلمي التي لا تقود الى تطبيقات تكنولوجية سريعة .

إن الابحاث التي تتناول المكان والزمان والكون ممارسة أكاديمية بحتة . فقد تكون النسبية العامة النظرية الوحيدة ، من بين النظريات الكبرى ، التي لم تحظ (بعد) بتطبيق تكنولوجي . فهي إذن موضوع «مأمون» . وحظ هذه النظريات ، في مجال التحري العلمي ، نابع من أن العلم يتقدم على جبهة عريضة . فالبحث العلمي في مجال ما يلقي ضوءاً على مواضيع أخرى ذات تطبيقات عملية فورية . وبالاضافة الى ذلك يمكن أن تقود المكتشفات الأكاديمية الصرفة نفسها الى تطبيقات تكنولوجية جديدة . ونظرية مكسويل الكهرطيسية مثال معروف على هذه الظاهرة . ذلك أنها لم تكن في البدء سوى توحيد رياضي لخواص الكهرباء والمغنطيسية أدى الى التنبؤ بالأمواج الكهرطيسية التي أصبحت وسيلة الاتصالات اللاسلكية والراديو والرادار . .

إن حجة العلميين في هذا الشأن مقبولة بلاشك ، وهم يرون أن هناك إساءة استعمال . فالمسوغ الجوهري للبحث الأكاديمي ليس التكنولوجيا بل المعرفة . ففهم الجنس البشري لهذا العالم هو الدافع الأقوى لاستمرار العلم . لكن مجتمعنا العصري المبني على أسس رديئة يضحي بالمعرفة على مذبح الاستغلال . هذا رغم أن المعرفة هي أجل

مايميز الانسان عن الباذنجان . ولو لم يكن المجتمع ليضع العلم في خدمة التكنولوجيا لكانت فضائل المعرفة والفهم مستساغة الطعم بتمامها .

هذا ويصعب دوماً على المجتمعات ذات الثروات المحدودة بذل جهود البحث وفق ترتيب الأفضلية الصحيح . فهل في هذه المجتمعات سبب يدعو لمواصلة البحث في مواضيع ، كبنية المكان ـ الزمان ، مقصورة على النخبة ؟

ومن السهل دوماً أن نتصور أن المهمة قد انتهت . فقبل اكتشاف النسبية ونظرية الكم بقليل كان المعتقد عموماً أن علم الفيزياء موشك على استنفاذ أغراضه . إذ كانت النظريات القائمة آنذاك تبدو مفسرة لكل الظواهر المعروفة ، باستثناء بضعة أمور غير نظامية لم تكن لتدخل في الإطار المعهود . ولم يكن ليخطر على بال أحد أن تكون هذه الأمور منطوية على أشياء عظيمة ، لأن أياً من النظريات الشائعة في ذلك الوقت لم تكن لتتكهن بعدم انطباقها عليها . فلم يظهر ، لدى فحص ميكانيك نيوتن ، أي سبب يدعو للظن بأنه عاجز عن تفسير الظواهر الذرية .

أما فيما يخص نظرية المكان ـ الزمان فكان الوضع مختلفاً . فنظرية النسبية العامة تتنبأ فعلياً بمجالات عجزها الخاصة بها ؛ أي أنها تتضمن جوهر حدود تطبيقها . وهذا واضح في حالة ماسُمي بالمتفردات . فهذه المناطق هي حدود المكان ـ الزمان ، ونظرية النسبية العامة لا تنطبق فيها . فنحن إذن بحاجة إلى نظرية جديدة ، إلى نموذج جديد . ويمكن أن نستنتج أننا لم نكتشف بعد كل الفيزياء . أما عن سمات هذه النظرية الجديدة فلا نملك وسيلة لمعرفتها سوى التكهن . وقد لا تحتوي حتى على مفهومي المكان والزمان كليهما . وربما تتجاوز ، على شاكلة الأثير ، إدراك الإنسان ومدلولاته اللغوية . لكن مما لاشك فيه أننا سنشعر بالخيبة والخذلان إذا تجاهلنا التحدي الذي يثيره المتفرد .

٧ ـ ٢ الحياة في هذا العالم

إن التطور الذي طرأ ، في خلال المئات الأخيرة من السنين ، على صورة المكان ـ الزمان والكون لدينا ، كان مصحوباً بتغير في فكرتنا عن موقع الجنس البشري في هذا العالم . فقبل كوبرنيق كان مثقفو المجتمع الغربي يضعون الجنس البشري في موقع المركز

من كل شيء . فكانت الأرض ، بصفتها موطن الجنس البشري ، تقف كمحور تدور حوله الدواليب الكونية . وبنية الكون كله مسخرة لمعيشة الجنس البشري وحدها ، التي هي هدف النشاط الطبيعي وسواه .

إن من الصعب القول بأن صورة القرن العشرين للجنس البشري على هذه الأرض ما تزال تصدر عن هذا الهاجس الأناني . فموقع الأرض في هذا العالم لم يعد الآن ذلك الموقع المرموق بل أصبح من عدة وجوه نموذجاً لمواقع كل أجزاء هذا العالم . والشمس بكواكبها التسعة الملحقة بها تبدو هي الأخرى نموذجاً عادياً جداً لبقية النجوم . فمثيلاتها مبعثرة بالملايين في أرجاء المجرة . كما أن مجرتنا نموذج عادي جداً لبقية المجرات . ومثيلاتها مبعثرة بالملايين في أرجاء العالم المرصود . ولما كانت شمسنا ومجرتنا نموذجيتين لهذه الدرجة فمن السهل أن نقبل أن كوكبنا وجوّنا الحي ومجتمنا ، هي أيضاً ، سمات نموذجية من سمات هذا العالم . ولدى النظر إلى الأرض بهذا المنظار الكوني أمكن اعتبار الحياة مرحلة من تطور منظومة هذا العالم . فمن الكرة النارية البدئية تشكلت الذرات . وفي النجوم اللاحقة نشأت النوى المعقدة . والمناطق الباردة في محيط النجوم شهدت تشكل جزيئات أكثر تعقيداً . أما المادة الحية فكانت خطوة متأخرة في الانتظام المجهري للمادة . وبموجب هذه الرؤية الحديثة تنبثق الحياة بصورة طبيعية من المواد الأولية الموجودة في النجوم . والتصور بأن هذا التطور مقصور على الأرض هو عودة متغطرسة إلى العقيدة الأنانية التي كانت شائعة قبل كوبرنيق . ومع ذلك ، وبالرغم من علمنا بأن مناطق الكون البعيدة لها البنية الفلكية نفسها والفيزياء نفسها والكيمياء نفسها (لأننا نستطيع رصدها في مداها الواسع) ، فان فكرة أن يكون لأجزاء الكون الأخرى البيولوجيا نفسها ما تزال تلقى معارضة شديدة . وسبب ذلك ناجم جزئياً ، ليس فقط عن أننا لم نكتشف قط ظواهر بيولوجية خارج كرتنا الأرضية ، بل وأيضاً عن الصعوبات الكأداء التي تحول دون اكتشاف هذه الظواهر إن وجدت .

إذا كانت الحياة ظاهرة عالمية حقاً فان ذلك سيغير حتماً كل تقديراتنا بخصوص مكانة الجنس البشري في العالم . ولن يكون الصدى الفكري لهذا التغير بأقل أهمية من الصدى الذي حدث بعد اكتشاف كوبرنيق بأن الأرض هباءة تافهة . فهل الحياة الأرضية تافهة أيضاً هي الأخرى ؟

نفحص بعض الأسباب الداعية لشيوع الطبيعة البيولوجية . هناك أولاً الملاحظات التي ذكرناها بخصوص عمومية الفيزياء والكيمياء في كل مكان . فهذه العمومية تبيح لنا أن نتكهن بأن الحياة تعتمد في نشوئها على مثل ما يحدث على الأرض . فاذا فهمنا الحياة الأرضية جيداً أمكن أن نستدل عليها خارج الأرض والمطلوب لنشوئها هو توفر بيئة ملائمة للنشاط البيولوجي . والبيولوجيا الأرضية تعتمد على حالة اختلال ترموديناميي ثابت ينجم عن قرب الأرض من منبع انتروبية كبيرة ، من الشمس . وبتعبير أولي نقول إننا في تدرج حراري . ومن الصعب أن نتوقع وجود حياة في ظروف أخرى . والفلكيون لا يستطيعون مشاهدة المادة البعيدة إلاّ لأنها في حالة اختلال . وقد توصلنا فعلاً ، من المناقشات المطولة التي أوردناها في الفصول السابقة ، إلى نتيجة أن ما حولنا لا يفتقر إلى تدرج حراري . وبالإضافة إلى ذلك هناك مشكلة ثبات هذا الاختلال . فالحياة لا تتطلب الاختلال فحسب ، بل والوقت أيضاً . وقد استغرقت البيولوجيا ثلاثة مليارات سنة لكي تطور مخلوقاتها من الوحل البدائي إلى الكائن البشري . وهذه المدة هي جزء كبير من عمر الشمس . وأي تغير طفيف في شدة نور الشمس لابد أن يسبب نتائج أليمة في التوازن البيئي الحرج الذي تعتمد عليه أكثر أشكال الحياة الأرضية تعقيداً . وتدل الأرصاد الحديثة على أن الشمس ما تزال في حالة ثبات راسخة . ورغم أن متطلباتنا الحيوية من الشمس تتمثل بالاختلال الذي تولّده في جوارها بفضل اندفاق كميات كبيرة من إشعاعها ، إلاّ أن هذا الاندفاق لا يسبب اضطراباً محسوساً في بنيتها الداخلية . والفوتون الشمسي الذي يدخل في أعيننا يستغرق وسطياً قرابة ثمان دقائق ليصل إلينا من سطح الشمس . لكنه يستغرق قرابة مئة ألف سنة ليصل من المركز إلى السطح . وهذا يعني أن التغير الترموديناميي في بيئة الشمس لا يمثل ، رغم الحاجة الملحة إليه لاستمرار الحياة ، سوى خسارة سطحها لمقدار طفيف من الطاقة . وهكذا يوجد تعارض هنا بين الاختلال الترموديناميي وبين الثبات الطويل المدى . ورغم أن النجوم تمر فعلاً بمراحل نشاط عنيف وقلق ، وهي تسير نحو مصيرها المحتوم ، فان نسبة كبيرة منها ما تزال ، كالشمس ، تشع بهدوء منذ مليارات السنين ، وكلها مرشحة لسكنى الحياة .

وبالإضافة إلى المستلزمات الترموديناميكية تحتاج الحياة إلى مواد أولية جوهرية . وفوق ذلك فان التفاعلات الكيميائية الحرجة ، الضرورية للتشكل التلقائي لتجمّع من الجزيئات العضوية الفائقة التعقيد ، لابد أن تكون عائقاً يحد كثيراً من عدد الأنواع البيئية الملائمة للبيولوجيا . وقد حصل في السنين التي تلت الحرب تقدم بيوكيميائي كبير نحو فهم الظروف الفيزيائية والكيميائية الملائمة لنشوء الحياة حتى عام ١٩٣٥ توصل ميلر S . Miller وأوري H . Urey ، في جامعة شيكاغو ، إلى سـ . تجربة مخبرية ذات ظروف تحاكي الظروف المظنون أنها كانت سائدة على الأرض منذ ثلاثة أو أربعة مليارات سنة ، وفي نهاية التجربة (التي استغرقت عدة أيام) تشكلت كميات كبيرة من الجزيئات العضوية الهامة . ولئن كانت هذه التجربة بعيدة عن أن تشكل مادة حية ، إلاّ أنها ومثيلاتها مما تبعها قد برهنت على الرأي القائل بأن كميات كبيرة من اللبنات الجزيئية « السلفية ـ البيولوجية » يمكن أن تتشكل بسرعة في ظروف عريضة . ومغزى هذا الاكتشاف يتضح من واقع أن الحياة الأرضية بكامل تسلسلها ، من الجرثومة إلى الجنس البشري ، تنبثق من تراكيب شتى من هذا العدد الصغير من اللبنات الأساسية . وقد يكون من الصعب تدبير تجربة مخبرية تنتج تلقائياً ، في أسابيع أو عشرات السنين ، ولو واحداً من أدنى العضويات الحية ؛ إلاّ أن بضعة ملايين من السنين كافية ، في رأي كثير من البيوكيميائيين ، لحدوث مثل هذا الأمر .

هذا وإن الانتقال من لبنات في بناء خامل إلى أول كائن حي جدير بهذا الاسم ومتكاثر من تلقاء ذاته ، لهو من الناحية البيولوجية أعظم بكثير مغزى وأثراً من التطور التالي الذاهب من العضويات الحية البدائية إلى التشكيلة اللاحقة من الأشكال البيولوجية المعقدة التي تسكن سطح الأرض . والنقطة الضعيفة في هذا التسلسل هي الخطوة الأولى ، وهي خطوة ما يزال يكتنفها الكثير من الغموض . ومع ذلك ، إذا سرنا مؤقتاً مع تفاؤل البيوكيميائيين ، نستنتج أن معظم النجوم ، التي تتحلى كشمسنا بمنظومة كواكب متصفة عموماً بما تتصف به أرضنا ، لابد أن تنطوي هي الأخرى على حياة كحياتنا الأرضية ، لكننا مع الأسف لا نملك مقومات رصد يبيح لنا أن نستنتج وجود كواكب تشبه الأرض خارج منظومتنا الشمسية . فالأرض نفسها أصغر بكثير من أن ترى في

مرقـاب معقول الحجم ولو من أقرب النجوم إليها ؛ كما أن مراقبنا الأرضية لا ترى شيئاً من الأجـرام الكـوكبية الصغـيرة التي يمكن أن توجـد في منظومات أخرى . على أننا ، بمـوجب ما نعلم من احتـواء منـظومتنـا الشمسية على كواكب أخـرى مشـابهة (الزهرة والمريخ . . . .) ، نملك نظريات عن التشكل الكوكبي تؤيد الظن بأن معظم النجوم تمتلك كواكب مشابهة . وقد اكتُشفت أجرام كوكبية مختلفة عن الأرض (أكبر منها بكثير) حول بعض النجوم القريبة ، ويذهـب بعض البيولوجيين إلى أن الحياة يمكن أن تتشكل في الظروف المختلفة جداً السائدة فيها . فالحياة التي نعرفها تعتمد على الكربون وتتطلب على الأرجح كميات كبيرة من الماء ، لكن من الممكن تصور أن بيولوجيات بديلة تستطيع النشوء معتمدة على أساس كيميائي مختلف كلياً . ومثل هذه التكهنات ذات أهمية عملية قليلة إذا قيست بالمعضلة العـامـة الأصلية . فالمسـألـة الكبرى هي : هل الحياة شائعة الـوجـود في هذا العـالم أم أنها حدث « معجـز » في القـرنـة المنـزوية التي تحتضننا ؟ وما البيوكيمياء البديلة سوى عامل قليل الأهمية من عوامل شيوع الحياة .

إن جوهـر التـطورات الحـديثة في فهم الأساس الكيميائي للحياة يبرز من خلال النظرة إلى أن المادة البيولوجية نوع من الحالة الفيزيائية الإضافية للمادة ـ غازية ، سائلة ، صلبـة ، بيولـوجية ـ وهي نظرة تتضمن أن تشكـل هذه الحـالة يتم بصورة طبيعية وآلية عندما تتوفر ظروفها . وقد كتب الفلكي الأمريكي ساغان C. Sagan مايلي : « إن أصل الحياة على الكواكب الملائمة يبدو مسجلاً في كيمياء العالم » . والحقيقة ، بكل بساطة ، أننا لا نعلم في الوقت الحاضر مدى احتمال وجود الحياة في أماكن أخرى من العالم ، لكننا وبالاعتماد على أسس عامة نستطيع أن نقول ، بشيء من التحفظ المتفائل ، إن الكواكب المسكونة أقرب إلى الشيوع منها إلى الندرة في هذا العالم .

واستناداً على هذا الافتراض نشأ علم جديد اسمه البيولوجيا الخارجية ، أي دراسة الحـياة خارج الكـرة الأرضـية . وهـذا العلم لا يحوي حتى اليوم سوى الكثـير من النظريات ! وفيه تنطرح تلقائياً طريقتان في البحث التجريبي عن الحياة خارج الأرض . وأكثـر هاتـين الـطريقتـين استقـامـة نحـو الهدف هي أضعفهما أملاً ، وهي تعتمد على الرحلات الفضائية . وقد استحوذ النجاح المدهش لبرامج الفضاء على الاهتمام بامكانية

السفر إلى عوالم أخرى ، وربما على الأمل بمصادفة أشكال حياة أخرى . وإذا تركز الاهتمام على الكواكب التسع في منظومتنا الشمسية فمن المؤكد أن الأمل قوي بأن تتيح التكنولوجيا في المستقبل تحقيق هذه الآمال . ولئن كان الحظ ضئيلاً في مصادفة حياة على هذه الكواكب العائلية إلاّ أنه غير مستحيل . ورغم أن ما نعرفه عن ظروف المريخ (وربما عن المشتري) لا يشجع على التكهن بوجود حياة عليه ، لكنه ليس مقنطاً أيضاً . هذا لدرجة أن بعض العلميين يعتقدون بامكانية وجود عضويات بدائية على واحد من هذه الكواكب على الأقل . ومما لا شك فيه أن وجود جرثومة ، ولو واحدة ، يغني عن ألوف التكهنات ؛ وسيشكل حتماً اكتشافاً عميقاً حقاً في سلسلة تطورات الصورة التي نرسمها لهذا العالم .

وعلى كل حال ، إذا كان لا يوجد حياة خارج الأرض في المنظومة الشمسية فلا مجال للتفكير في بناء صواريخ أكبر وأحسن بهدف السفر إلى النجوم . ذلك أن أقرب النجوم إلينا يقع على مسافة أربع سنوات ضوئية وربع (فكِّر أن القمر يقع منا على مسافة ثانية ضوئية وربع فقط) . والسفر إليه ، بسرعة الصواريخ الشائعة ، يستغرق ألوف السنين . وإذا استطعنا تحقيق سرعة قريبة من سرعة الضوء فان مفعول تمدد الزمن سيختصر مدة سفر طاقم الصاروخ ؛ وهذا سيتيح مبدئياً السفر عبر آلاف السنين الضوئية ـ أي عبر قطر مجرتنا بكامله ـ في مدة لا تتجاوز فترة حياة إنسان واحد . إلاّ أن عودة السفينة الفضائية إلى الأرض لن تتم ، بسبب « مفعول التوأمين » ، إلاّ بعد مضي آلاف من السنين من مستقبل الأرض ، وسيجد ملاحوها عندئذ أن زملاءهم الذين أرسلوهم قد اختفوا منذ زمن سحيق . هذا ولو استطعنا التغلب على الصعوبات التقنية التي تحول دون الوصول إلى سرعة قريبة من سرعة الضوء فان الطاقة اللازمة لذلك ستكون هائلة جداً . فالصاروخ يتطلب للوصول إلى ٩٩٪ من سرعة الضوء ملايين الملايين من أطنان الوقود .

تلك هي العقبة بالضبط . فالصعوبات التقنية (على عِظمها) يمكن حلها ؛ لكنك لن تجد إنساناً يقبل أن يخوض هذه المغامرة التكنولوجية العملاقة دون سبب وجيه جداً . ولو أننا حللنا مشكلة الاتصال بكائن حي خارجي فسنواجه معضلة شاقة أخرى وهي : أين نجده ؟ وهكذا ، حتى لو كانت الحياة ظاهرة عالمية شاملة ، لا نستطيع أن

نقـدر درجـة شيـوعها إلّا بشكل تقريبي . ونحن ، فوق ذلك ، لا نملك وسيلة متفقاً عليها لتقدير شيوع حياة ذكية .

وبـالافـتراض المتفـائـل بأن الكـائنات الذكية ستطور تلقائياً على كواكب صالحة بيولـوجياً للحياة أمكن تقـدير أن عدد المجتمعـات الذكية في مجرتنا يبلغ عشرة أضعاف الحياة الـوسطية لهذه المجتمعات مقاسة بالسنين . لكن هذه الحياة الوسطية مجهولة تماماً بالطبع ، وهي تتوقف إلى حد ما على ما تعنيه بكلمة ذكاء .

يمكن أن نقدر عدد سنوات الحضارة للمجتمع الانساني ببضعة آلاف سنة ، وقد تكـون في حالـة اقـتراب من دمـارها الخاص عبر التكنولوجيا . فاذا كان الأمر كذلك ، وكـانت تجربتنـا نوعية ، فقـد يوجـد في مجرتنا عشرات الألوف من الكواكب التي تحمل حضارات ذكية . ومن جهة أخرى ، قد تستغرق فترة حياة المجتمعات الحضارية ملايين السنين أو أكثر ؛ وفي هذه الحالة يُقدر عدد الكواكب المسكونة في مجرتنا بمئات الملايين .

كل هذا يبـدو مدهشـاً ، لكن أمـر المكـان الـذي يجب أن نفتش فيه عن هذه الكواكب ما يزال معضلة عويصة ، لأن المجرة تحوي قرابة مئة مليار نجم . وحتى لو كان يوجـد مئة مليون صالحة للحياة الذكية فان ذلك يتطلب منا أن نتحرى ألوف الكواكب لتحقيق أمل معقول بالنجاح . وهذا يستلزم رحلات إلى كل النجوم المشتبه بها والواقعة منا على مسافة مئة سنة ضوئية أو نحوها . ومن الصعب مقاومة أن نستنتج أن الاتصال المحسوس فيما بين الحضارات الكوكبية حدث فائق الندرة في هذا العالم ، أو معتمد على نزوات بحتـة . (وهذا الاستنتاج يحتمل بالطبع الشك لأن أسباب الحضارات الخارجية المتقدمة علينا ربما بملايين السنين مجهولة تماماً ، وقد نكون عاجزين عن ادراكها) .

ربما كان انعدام الفائدة من السفر بين النجوم أقوى حجة تساق ضد العمل على تحقيقـه . فاستكشـاف الأرض كان مبعثـه دومـاً الاستعـمار أو التجـارة أو الحصول على المعلومـات . أمـا الاستعمار والتجارة فيمكن استبعادهما من بواعث السفر بين النجوم . ذلـك أن نقل مجموعات بشرية أو بضائع استهلاكية عبر مسافات تقدر بالسنين الضوئية فكرة سخيفة . أما المعلومات ، على الصعيد الكوني ، فهي أهم السلع التي يمكن تبادلها فيما بين المجتمعات الحضارية . وهي ، على كل حال ، لا تستلزم أي انتقال مادي إلى النجـوم البعيدة ؛ إذ يمكن تبادلها بواسطة أمواج الراديو مثلاً . فلا شيء يتحرك بأسرع

من الأمـواج الكهرطيـسية ، وهي على صعيد الزمن أفضل وسائل الاتصال جميعاً . وهنا نصطدم مرة أخرى بمشكلة المكان الذي يجب أن نفتش فيه . فقد تكون ، في مجرتنا ، نسبة المجتمعات المتحضرة ، التي طورت تقنية اتصال راديوية ، صغيرة جداً ؛ وهذا يزيد في تعقيد مشكلة المكان الآنفة الذكر . على أن استخدام مراقب راديوية متوسطة الحجم يمكن أن يفيد في مسح منهجي لآلاف المواقع المشتبه بها ، أملاً في استقبال رسالة راديوية من نوع ما . والمرقاب الراديوي الأكبر الذي نمتلكه ، وهو الموجود في بورتوريكو ، قادر بتجهيزاته على الاتصال بأي منطقة في مجرتنا .

وفي السنـوات الأخيرة جرت عدة محاولات لاكتشاف إشارات راديوية صادرة عن حضـارات تقنية تجاورنـا في المجرة . لكنها أخفقت كلها . كما أذيعت من عندنا رسائل عديدة . ورغم أن الفكرة كلها قد لا تستحق كل هذا العناء وهذه التكاليف ، إلاّ أنها تبدو بالتأكيد ذات ثمن متواضع إذا قيست بالمغزى العظيم لحصول مثل هذا الاتصال . وقد تكون هنا حاجة لتطمين القارىء الذي يخشى من إظهار وجودنا لأجناس أجنبية قد تكون عدوانية . إذ حتى الأمواج الراديوية ، وهي التي تتحرك بسرعة الضوء ، تستغرق مئة سنة لتصل الينا من مسافة مئة سنة ضوئية . فنحن في رسائلنا الراديوية ، ناهيك عن جيش الغزاة ، نضطر لانتظار جوابها مئتي سنة على الأقل .

وبما أن الجنس البشري ما يزال في بدء محاولات اتصاله ، فان شيئاً واحداً يجب التفكير فيه . فلئن كانت هذه المحاولات تملك حظاً من النجاح فما ذلك إلاّ باعتبار أن فترة الحياة الوسطية للحضـارات التقنية تبلغ ملايين السنـين . ولما كان عمـر مجتمعنا التكنولوجي لا يزيد عن بضع عشرات من السنوات ، فسنكون في مجرتنا أكثر مثل هذه المجتمعات شباباً . والمجتمع الذي سيتجاوب معنا لابد أن يكون ، على الصعيد العلمي والثقـافي والأخـلاقي ، أكثـر تطوراً بما لا يقـاس ، وربـما لا نستطيع إدراكـه بعقولنا . وبالفعل ، قد لا يكون أذكى متوجاته مخلوقاً بيولوجياً ، بل آلة مفكرة . فنحن ، حتى في سويتنا العلمية الراهنة ، نستخدم الحاسبات الالكترونية على نطاق واسع في تدبير شئوننا وفي تحليلها وتنفيذها .

قد تشكل المعرفة العلمية المستقبلية خطراً أكبر على حياتنا الأرضية . لكن الحضارة التي عمرها مليون سنة لابد أن تكون قد وجدت حلولاً لمشاكلها الاجتماعية . وقد تُنقل

الينا المعلومات اللازمة لبناء مجتمع جديد قبل أن نحصل على المعلومات اللازمة لتكنولوجيا جديدة .

٧ ـ ٣ درجة خصوصية هذا العالم

إن من المذهل أن يعرف الانسان ، في مدى عشر سنوات من الرصد الفلكي الراديوي ، عن خلق هذا العالم وعن نظامه أكثر مما علمته إياه الديانات والفلسفة على مدى ألوف السنين . ولابد أن نستفيد من معرفة كيفية إسهام المعلومات الحديثة الفيزيائية والفلكية والكونية في رسم صورة علمية للجنس البشري في هذا العالم ، ومن مقارنة هذه الصورة بالمعتقدات الدينية الموروثة .

لقد كان الجنس البشري ينظر إلى العالم على أساس أنه شيء بني لهدف مقصود . أي أن أشياءه قد نُظمت بطريقة تلائم الحياة البشرية . فبيئتنا غنية بالتسهيلات التي تجعل الحياة ميسرة وممتعة . ففيها الكثير من الماء الصالح للشرب والهواء الصالح للتنفس ، وجو الأرض يحجب الاشعاعات المؤذية الآتية من الفضاء ، والشمس تنير أيامنا وتدفئها لكنها تغيب في الليل كي تتيح لنا أن ننام ولا تشع إلّا بما يكفي لتكون الحرارة مريحة لنا ودون أن نعاني منها فروقاً كبيرة ، والكوارث الجيولوجية نادرة . أليست هذه الخبرات كلها واقعاً حقيقياً ؟

إن من الصعب جداً أن نعرف بالضبط كيفية اتزان الحياة على صعيد الفيزياء والكيمياء . لكن الحياة قد تطورت على هذا الكوكب وبذلك استطاعت أن تتكيف مع الظروف السائدة عليه . ويحسن بنا، بدلاً من أن نقول إن العالم قد صيغ لراحتنا ، أن نقول إننا قد صُنعنا بما يلائم ظروفه . لكننا لسنا متأكدين من مدى التغير الذي طرأ على تنظيم العالم قبل أن يتاح ظهور أي شكل من أشكال الحياة . فمن المظنون عموماً أنه لو كانت قيم بعض المقادير ، التي تبدو لنا ثابتة ، تختلف قليلاً عما هي عليه في الطبيعة لأدى ذلك إلى تغيرات كبيرة في ظروف هذا العالم . فالهدروجين الحر مثلاً ـ وهو الوقود الشمسي ، عماد الحياة على الأرض ـ كان سيندمج كله بسرعة كبيرة ليشكل الهليوم في الانفجار الأعظم لو كانت شدة هذا الاندماج أكبر ببضعة أجزاء مئوية مما هي عليه . وعلى

كل حال يجب على المرء ، في حالة فقدان المعلومات الصادقة عن سلوك المادة الحية في شتى الظروف ، أن يكون متحفظاً في استنباط النتائج النهائية بخصوص مدى التماسك الحقيقي لمجريات الحياة في هذا العالم .

أما بخصوص وجودنا فيمكن أن ننظر إليه من زاويتين مختلفتين . تقول أولاهما بأن العالم قد خُلق بطريقة خاصة جداً تتيح للحياة وللبشر فرصة التطور . وتقول الثانية بأنه لو لم تكن الأشياء كما هي لما كنا نحن هنا لنهتم بها ونتأمل فيها . إن كلا هذين القولين يتلاءم مع الفكرة القائلة بأن نشوء الحياة يُلزم العالم ، كثيراً أو قليلاً ، بأن يمتلك سمات معينة . ومن المفيد أن نفتش بالضبط عن المظاهر الطبيعية التي يجب أن تُشاهد بموجب واقع أننا هنا لنقوم بالمشاهدة قبل كل شيء . ذلك أن بعض العلميين يرون أن وجودنا بالذات ينبثق كتجاوب مع بعض سمات هذا العالم .

وكمثال أول على هذه المحاكمة نذكر أن محتويات هذا الكتاب عالجت بالتفصيل توبولوجية هذا العالم وهندسته واللاتناظر فيه . لكنها لم تتعرض إلى كبره . إن الاتساع الهائل لهذا الكون يثير الرهبة . فمليارات النجوم مفصولة فيه بمسافات تقاس بالسنين الضوئية ، والمجرات بملايين السنين الضوئية . ولكي تأخذ فكرة محسوسة عن سلمّ هذه الأشياء تصور أن مدار الأرض حول الشمس ، وهو الذي يبلغ قطره ٣٠٠ مليون كيلو متر تقريباً ، قد تقلص إلى قطعة نقدية مع هباءة في مركزها تمثل الشمس . إن أقرب نجم سيقع عندئذ على مسافة كيلو مترين منها . وسيبلغ إتساع المجرة قيمة تحوي الأرض كلها . وستقع مجرة المرأة المسلسلة ، وهي التي تكاد لا ترى من الأرض بالعين المجردة ، على مسافة نصف مليون كيلو متر ، أي بعد القمر عنا تقريباً . أما أبعد المجرات التي ترى في أضخم مراصدنا فستقع على مسافة مليار كيلو متر . والواقع أن كثافة العالم المادية ضعيفة لدرجة أن قيمتها الوسطية لا تساوي سوى ذرة واحدة في كل ألف لتر من الفضاء . ولو تكثفت كل مادة هذا العالم في قطرات ذات كثافة تساوي كثافة الماء لما احتلت سوى ١٠^-٢٨^ من ١٪ من حجم العالم !

لماذا العالم كبير لهذه الدرجة ؟

تذكر أولا أن العالم ليس في ظرف سكوني بل في حالة توسع . وثمة دلائل جيدة على

أنه كان في الماضي في حالة كثافة كبيرة . وتوسعه ضروري لنجاته من الارتصاص على نفسه في شكل متفرد . وهذا التوسع يتباطأ (على الأرجح) تدريجياً بمعدل محكوم بالكثافة التي تعود لتشجعه على التراجع . وفي نماذج فريدمان ، المشروحة في الفصل الخامس ، يوجد قيمة معينة واحدة لهذه الكثافة . وهذا يعود إلى القول بأن معدل تباطؤ العالم في توسعه يتعين بكثافة المادة . فلو كان العالم أكثف بكثير لكان التباطؤ أشد بكثير

ينتج من ذلك أن كثافة النجوم المرصودة اليوم تتعين بعمر العالم . ولا نملك نموذجاً فريدمانياً بسيطاً يتيح لعالم عمره عشرة مليارات سنة أن يحوي نجوماً مفصولة ، مثلاً ، ببضعة أيام ضوئية .

إن هذا هو موعد ظهور الحياة . فالحمل البيولوجية تحتاج إلى مليارات السنين كي تتطور إلى كائنات ذكية (نحن) . فالتطور عملية ذات درجات عديدة جداً ، وتتعرض لعدد هائل من التفرعات الزائفة . وهي تتوقف على عدد كبير من الطوارىء الصغيرة بين جيل وآخر .

وبالاضافة إلى ذلك تعتمد الحياة الأرضية (وكل حياة على الأرجح) على الكربون . وهذا الكربون قد تشكل في النجوم الثقيلة منذ نحو مليار عام . فهذه النجوم تحتاج إلى ملايين السنين كي تتشكل وتركب الكربون وتنفجر . ماذا وإلّا ، أي لو كان عمر العالم أقل من مليارات السنين بكثير ، لما كنا هنا لنشاهده . فالعالم واسع جداً لأنه شيخ كبير . وذلك يستتبع أن وجودنا مرهون بأن تكون المسافات فيما بين النجوم شاسعة جداً جداً . ومن سخرية القدر أن تكون الظروف الضرورية لنشوء حياة ذكية هي نفسها الظروف التي تحول دون الاتصال المادي فيما بين شتى الحيوات الذكية .

ولكبر الكون مغزى آخر يتصل بأعداد النجوم في السماء . وبالفعل فان نظرة واحدة إلى السماء تعطي انطباعاً بوجود ملايين النجوم ، لكن هذا خطأ . فالشخص العادي يرى في أفضل الظروف بضعة آلاف فقط . لكن النظارات الفلكية الشائعة تري ما يقرب من مليار مليار نجم . أما عدد الذرات في كل منها فيصل إلى رقم هائل يقرب من 10^{80} . فلماذا كان هذا العدد كبيراً إلى هذه الدرجة ؟

إن اتساع العالم بهذا المعنى غامض بعض الشيء . ففي نماذج فريدمان المتوسعة

يظهر حجم العالم لا متناهياً في الكبر ، وهذا يعني عدداً لا متناهياً من النجوم الهاربة نحو الخارج في كل الاتجاهات وإلى الأبد . لكننا على كل حال لا نملك وسيلة لمد النظر إلى كل هذه النجوم . ولكن لو كنا نعيش في عالم من نموذج متقلص وفي اتساع محدود فاننا لن نرى سوى جزء من هذا الاتساع مهما كانت وسائلنا في الاستكشاف جيدة . وسبب ذلك أنك لا تستطيع في عالم عمره عشرة مليارات سنة أن ترى ما هو أبعد من عشرة مليارات سنة ضوئية . فالأبعد من ذلك يقع « قبل الزمن » . فحدود الرؤية هو الأفق الذي ذكرناه في الفقرة ٥ ـ ٣ . وكلما هرم العالم ابتعد هذا الأفق ـ إنه يهرب ما سرعة الضوء . ومن ذلك ينتج أن كبر عدد النجوم في العالم ناجم عن عظم بعد الأفق الذي يتوقف هو الآخر على شيخوخة هذا العالم . وهكذا نرى مرة أخرى أننا يجب أن لا نتعجب من هذا العدد الهائل . فوجوده ناجم عن وجود علماء الكون .

وثمة سؤال آخر مشابه لما سبق وهو : « لماذا كان العالم مظلماً لهذه الدرجة ؟ » . لقد أجبنا عن هذا السؤال في الفصل الخامس بمناسبة مفارقة أولبرس . لكن ذلك لم يكن القصة بكاملها ، لأنه لم يتناول سوى ضوء النجوم . لقد بدأ العالم بانفجار حار ثم راح يبرد بعده بسبب التوسع إلى أن بلغ اليوم ثلاث درجات أو نحوها فوق الصفر المطلق . فالسماء ليست إذن سوداء تماماً ، لكنها ذات توقد خافت في منطقة الطيف تحت الأحمر . ويحتاج كشف هذا « التوقد الخافت » إلى مرقابات راديوية خاصة .

قد يبدو أنه لا يوجد سبب يحول دون أن تكون درجة الحرارة هذه من رتبة ٣٠٠ درجة مطلقة (أي درجة حرارة الغرفة العادية تقريباً) بدلاً من ثلاث درجات . الواقع أنه لو كان الأمر كذلك لما وُجدنا . والسبب في ذلك ، أولاً ، هو أن هذه هي درجة حرارة الأرض تقريباً ، وهذا الفرق يتيح توطد الاختلال الترموديناميي الحاسم الضروري للحياة والذي لا يحدث إلاّ على كوكب أسخن من ثلاث درجات بكثير يستطيع فيها الماء أن يتبخر . ولما كان الماء على الأرجح ضرورياً للحياة نكون عندئذ أمام مشكلة . والأخطر من ذلك ، ثانياً ، هو أن مثل هذا الإشعاع الغزير كان سيمنع تشكل المجرات بالسيطرة على المادة وجذبها الثقالي . والحياة لا يمكن أن تنشأ بدون مجرات .

وقد جرت عدة محاولات لامتحان تلاؤم الحياة الذكية مع السمات الأساسية لهذا

الكون . فقد طرح الرياضي البريطاني كارتر B. Carter السؤال التالي : « لماذا الثقالة ضعيفة لهذا الحد ؟ » لنتذكر أن الثقالة أضعف بـ ١٠^٤٠ مرة من القوى الكهربائية في الذرة ، ومع ذلك فهي تتحكم بحركة العالم . ولدى التأمل في تطور النجوم بيّن كارتر أن هذه النسبة تعيِّن فترة حياة النجوم . والنجوم المتوازنة ذات الأجل المديد شرط جوهري للحياة الذكية .

وفي مجال آخر اضطلع هوكنغ وكولنز بالإجابة عن أكثر الأسئلة صعوبة وغموضاً ، وهو : « لماذا كان العالم متناحياً لهذه الدرجة ؟ » لقد كانت هذه المسألة موضع دراسة بعدة طرق وقد أشرنا إليها في الفقرة ٥ ـ ٥ . ويرى هوكنغ وكولنز أن المجرات لايمكن أن تتكون ، وأن الحياة لا يمكن أن تتطور إلا في عالم متناحٍ . وتعتمد محاكمتهم على البحث ، في المدى الحركي الواسع لهذا العالم ، عن الظروف البدئية المطلوبة لنشوء هذا التناحي .

وكمثال آخر ، كنا لفتنا النظر إلى ضرورة أن يكون العالم في حالة اختلال ترموديناميكي كي يتاح للجمل البيولوجية أن تتكون . واللاتناظر الزمني لهذا العالم ، وهو الذي نشعر به واضحاً في الحياة اليومية ، هو ملح لابد منه لطبخة الحياة .

الواقع أننا لم نستنفد كل ما قيل عن الحياة في هذا الكون . فما يزال بالامكان أن نضم إلى هذه التأملات صفات أخرى للمكان ـ الزمان ، كوجود الأبعاد . ومن المهم أن نعلم أن وجود الحياة الذكية في هذا العالم لا يعلل هذه الصفات . وكل ما يمكن أن نقوله هو أن اختلاف هذه الصفات عما هي عليه كان سيحول دون وجودنا ، ومن ثم ، دون الشعور بها . وقد ذكرنا في الفصل السادس أن بعض الكونيين يرتؤون وجود عدة عوالم لا عالم واحد ، وأن كل عالم ينطوي على ظروف ، وربما أيضاً قوانين فيزيائية خاصة به . وقد اتفق أن وُجدنا في واحد خاص جداً منها (كبير ومتناح وبارد و . . .) لأنه ببساطة النوع الوحيد الذي نستطيع العيش فيه .

ورغم أن بنية هذا العالم (اتساعه وتوزع المادة واختلالها فيه) في مداه الواسع تظهر محكومة بوجود علماء الكون ، فان بنيته في المدى الضيق ذات وضع معاكس . فالنظرة الدينية الموروثة ترى أن البنية المحلية ، أي الأرض وصفات سطحها والشمس الخ ، تمثل تنظيماً خاصاً جداً في هذا العالم . وتفترض أن هذا الاتساق العظيم المتميز قد صُنع ضمن العالم في بدء خلقه . لكن العلم الحديث يرى في النجوم والكواكب ، ضمن المدى

المحدود ، أشياء تكونت طبيعياً وآلياً بعد كرة النار البدئية . فهو إذن ، وبدلاً من أن يفترض وجود هذه البنية في بدء الخلق ، يرى ضرورة افتراض العكس تماماً . أي أن العالم بدأ في حالة توازن محلي ، با لحركات المجهرية العشوائية . أي أن البدء كان حالة فوضوية ، ثم انبثقت البنية المنظّمة من الفوضى بشكل آلي كنتيجة للتوسع الكوني . وهذا لا يتطلب من الظرف المجهري للعالم في بدء خلقه سوى أن يكون فوضوياً تماماً . ولم تعد هناك حاجة لافتراض أن تنظيم العالم يتطلب وسيطاً منظّماً يصوغه في حال خاصة جداً . فمثل هذا التنظيم ينجم بآلية طبيعية عن قوانين الفيزياء وعن توسع العالم ضمن أوسع ما يمكن أن نتخيل من ظروف في سلّم بدئي صغير .

نحن إذن أمام انقلاب مذهل في صورة العالم . فبدلاً من أن نعزو خصائص البيئة المحيطة بنا عن قرب ، بما فيها وجودنا ، إلى حوادث موضعية معجزة ، ومن أن نرى في بنية العالم على المدى الواسع شيئاً لا علاقة لنا به ، يبدو الآن أن الكونية هي العامل المهم ، أي أن الظرف المحلي يهتم بنفسه من تلقاء نفسه . فاذا توفرت الخصائص الكونية الملائمة بمجملها ، فان ظهور النجوم والكواكب والحياة والذكاء في هذا الكون يصبح قدراً شبه محتوم .

فما هي درجة خصوصية هذا العالم إذن ؟ انه ، بمجمله ، خاص جداً ، لكنه محلياً عادي تماماً .

إن هذه النتيجة المنكرة قد لا تروق للقاريء الذي يحب أن يرتفع بأسباب وجوده إلى مصاف توزع المادة والاشعاع في مناطق العالم النائية وفي لحظاته الأولى ، لا أن ينحدر بها إلى سوية دنيوية لا تعدو الكوكب الأرضي . لكنك إذا نظرت للحياة بهذا المنظار ، وسواء كانت ظاهرة عامة في هذا الكون أم لا ، فاعلم أن ظهور الجنس البشري في هذا العالم حدث كوني حقاً .

لقد ذهبنا بعيداً جداً عن تعليل الكتاب المقدس لعملية الخلق . فالضوء فيه والدفء والتنظيم والحياة انبثقت كلها من الظلام والعدم . فالعالم فيها مفعول يسببه فعل من الله يستجيب لارادة سابقة في صنع هيئة تحتل مكاناً وزماناً موجودين سلفاً لكنهما مجردين عن الأهمية . أما تقدير العلم الحديث فعميق الاختلاف مع هذه النظرة . ففيه انبثق العالم من

جحيم من الحرارة والضوء ثم برد وأظلم فبدلاً من الآية الانجيلية ، « ليكن هنا النور » ، يطرح العلم مقولته : « ليكن هنا الظلام » ، لأن الطاقة المحبوسة في الشمس لا يمكن ، إلاّ في عالم بارد ومظلم ، أن تكون ميسَّرة الفائدة في توجيه العمليات الحيوية على سطح الأرض . وبالاضافة لذلك يتعامل الفيزيائيون مع المكان والزمان على أساس أنهما كينونتان فيزيائيتان . وتبين نظرية آينشتاين في النسبية العامة كيف تنشر المادة أو تختفي عند حدود المكان ـ الزمان . وإذا كان العالم قد خُلق حقاً قبل ١٠ مليارات سنة ولم يكن ذا عمر لا نهائي فان المكان ـ الزمان قد برز إلى الوجود آنئذ أيضاً . ويكون المتفرد البدئي بكل حق مفعولاً غير مسبوق بأي سبب ، لأنه لم يكن يوجد قبل ذلك مكان ولا زمان ـ ولا أي شيء فيزيائي ـ لاحتواء هذا السبب . وتصورٌ أن الله كان موجوداً في طور مبكر من هذا الكون ، وأنه كان لديه دافع يسبب هذا العالم ، هو تصور ساذج تماماً ، مع ما ينتج عنه من منح الألوهية صفة كائن بشري مقتدر . ولا تقتصر فكرة السبب والمفعول على وجوب وجود الزمان كوعاء للعمليات بل إنها تتطلب أيضاً اللاتناظر الزمني . لكن الزمن وعدم تناظره خصوصاً هما خاصتان محسوستان من خواص العالم المادي لا يكتسبان معناهما إلاّ بعد حدوث الخلق ، وقد بينا فعلاً أن اللاتناظر الزمني لا يتوطد إلاّ بعد زوال التوازن البدئي بفعل التوسع الكوني .

لقد شهد تاريخ الجنس البشري محاولة لوضع نموذج متطور لهذا الجنس يستدعي وسائط علوية لتفسير خصائص الظواهر الطبيعية ذات الأسباب الغامضة . فالمجتمعات البدائية ، التي كانت تجهل علم الفيزياء ، لجأت إلى آلهة من شتى الأنواع وتختص بوظائف ، مثل « تسبيب » المطر والطوفان والبرق والشهب ، الخ . وكان لهذه الآلهة القديمة صفات بشرية قوية وكان يُعتقد أن لها أجساماً مادية ذات مظهر فيزيولوجي بشري ومقدرات فكرية ودوافع نادراً ما تختلف عن دوافع الأولاد . أي أنها كانت ، بموجز القول ، بشراً فوق البشر . حتى أن الديانات الموحدة المبكرة لم تقاوم إغراء تصوير الله بصورة البشر ، ولدرجة أن جعلته محارباً منحازاً ذا مقدرة فائقة يتدخل بحماس في منازعات القبائل المحلية .

ومع تقدم علم الفيزياء ، في عصر النهضة والنور ، راحت هذه الوسائط العلوية

تنحسر بالتدريج عن علمي الفيزياء والفلك ، وبدأت تنمحي بسرعة صورة الأحد المادي الذي يملك جسم إنسان ومقدرة إله . وحلت جملة « الله الخارجي هناك » محل جملة « الله العالي هناك » التي قالها اللاهوتي البريطاني جون روبنسون . وعلم الفلك لا يترك مجالاً للاهوتية فيزيائية في السماء ، وبذلك يبرز مفهوم جديد لله يجرده عن المادية ويسمو به فوق عالم المكان والمادة المحسوس ، إله يتعالى عن المادة .

ورغم النجاحات المذهلة التي أصابتها العلوم الفيزيائية في تعليل الظواهر الطبيعية دون اللجوء إلى وسيط سببي علوي ، فان ضآلة المعرفة بالجمل البيولوجية والاجتماعية تترك مجالاً للعديد من وجهات النظر التي ترى فيها سبباً علوياً . فلئن أمكن الاستغناء عن الله في تعليل حركة الكواكب ، فانه ما يزال ضرورياً لخلق الحياة . الواقع أن الثورة الداروينية نقلت الله في الزمان ثلاثة مليارات سنة إلى الوراء ، وعلى غرار ذلك تماماً نقلت الثورة الفلكية الله إلى خارج المكان . إن الجنس البشري لم يكن معجزة ، إنما هو نتاج تطور - أحداث وقفزات حياتية - استغرق دهوراً من التكيف بعد أبسط شيء حي . إن حل الألغاز الأساسية ، الكيميائية والفيزيائية ، للحياة هو الخطوة التالية التي لابد منها لشرح العالم المادي كله بلغة المبادىء العلمية . ومع أن التجارب المخبرية لا يمكن أن تدوم تلك الملايين من السنين اللازمة لتطور عناصر المادة العاطلة إلى مادة حية ، فقد أمكن صنع لبنات الحياة كما أمكن تفكيك أبسط الكائنات الحية إلى اللبنات التي بنيت منها . ونحن نخطو اليوم الخطوة التالية : إله خارج مجال الحياة . وقد يتمسك البعض بفكرة أن فهمنا للنظام الاجتماعي والأخلاقي يُخرج الله تماماً من شئون البشر .

وهكذا وبالقاء نظرة إلى الوراء نرى أن فكرة اللجوء إلى فعل من الله جرى في الكون أثناء خلقه هي فكرة مبعثها شيء قريب من اليأس من أي تعليل آخر . وتصوير الله على شكل الإنسان ناجم عن اعتقاد الجنس البشري بأنه موئل كل شيء ؛ وهذا الاعتداد المفرط أدى إلى السمو بمثل هذه الألوهية عن كل الأشياء المنتمية إلى العالم المادي . وإن عزو خلق العالم ، حتى لو كان هناك خلق ، إلى فعل من الله ، هو وقوع في فخ لا يختلف عن اعتماد إله للمادة أو إله للحياة . إنه ، مرة أخرى ، اعتماد إله لا يختلف وضعه عن وضع البشر ، وهو فوق ذلك بشر موجود في العالم المخلوق بما فيه من لاتناظر زمني وترتيب سببي زمني .

لقد أبرزنا مراراً في هذا الكتاب كيف يدخل الزمن الفيزيائي الأساسي في صوغ كل تعابيرنا عن مجمل مفهومنا للجنس البشري والعالم . فاختلاف الماضي عن المستقبل نافذ إلى أعماقنا . إننا نستذكر الماضي بشيء من الحنين ، أو الحسرة ، ونواجه المستقبل بالخوف أو بالأمل . وكل نشاط الإنسان محكوم بخبرة الماضي وبتوقع المستقبل . والدوافع هي أيضاً نتاج للاتناظر الزمني . ينتج من ذلك أن عزو دافع إلى الله في غياب اللاتناظر الزمني ، وحتى في غياب المكان والزمان والمادة ، هو تجسيد بشري مناف للمنطق . فخلق العالم ، كما أوضحنا آنفاً ، لا يمكن أن يسببه دافع سابق . فاجتماع الخلق والدافع شيء متناقض منطقياً . وهكذا تنشأ الضرورة للانتقال إلى مفهوم أكثر عمقاً ، إلى إله خارج المكان ـ الزمان .

هل يمكن أن نعزو الخلق إلى أحداث تقع بعده ، على شاكلة المفعولات المتقدمة في نظرية ويلر ـ فاينمان في الماضي ؟ ماذا عندئذ بشأن العوالم ذات التناظر الزمني ، ولنقل العوالم التي تتقلص إلى « غلق سالب » ، إلى نهاية ؟ وكيف يمكن للطرفين الزمنيين أن يتولدا بشكل سببي عن ما يحدث في المجال الواقع بينهما ؟

إن خير جواب عن هذين السؤالين هو إنكار متانة الصلة بين السبب والمفعول . إنهما في جوهرهما مفهومان بشريان لظروف بشرية . انهما ، في أحسن الأحوال وعلى صعيد الفيزياء ، يصفان التفاعلات ذات الاتجاه الزمني الواحد بتعابير تفكك التنظيم ، وهو نفسه (كما لاحظنا في أواخر الفقرة ٣ ـ ٤) فكرة بشرية بحتة . ويجدر بنا عندئذ أن نعتبر العالم كـ « ظاهرة كلية » : أي ، كما يقول الرياضي الألماني فايل H . Veyl (١٨٨٥ ـ ١٩٥٥) : « إن العالم لا يحدث ، إنه يكون ، بكل بساطة » . انه لا يحتاج إلى أن ينطلق من بدء ، ولا أن يسلك بعناية مسلكاً مرسوماً نحو مصير مجهول . إن العالم هو بالأحرى مكان ـ زمان ، مادة وتفاعلات ، تمتد من الماضي إلى المستقبل ، ومن موضع إلى موضع ، ومن حدث إلى حدث ، كل ذلك في تشابك واسع من التعقيدات والوجود .

٧ ـ ٤ العقل في العالم

قد يكون المنظور المستقبلي لهذا الكون موحياً ومرعباً معاً ، لكنه ليس المنظور المستقبلي

للجنس البشري ، فالانسان يمعن النظر في العالم حوله ويسعى إلى ادراكه وتفسيره وتمثله . وهو ، بخلاف الله الموجود خارج المكان ـ الزمان ، جزء من المكان ـ الزمان . ومن هذه الزاوية ، فان النظريات الكونية التي ناقشناها في هذا الكتاب لا يمكن تناولها بالتجربة الفعلية للكائنات البشرية . وهذا التناول المنقوص ناجم عن أن الكائنات البشرية لا ترى الظاهرة بتمامها ، لكنها ترى العالم من نافذة صغيرة ـ نافذة عقولنا .

إن الصورة التي نراها من هذه النافذة « شريط سينمائي » . إنها تتحرك ، فالعالم يعج بالنشاط . لماذا ؟

إن الأشياء تحدث لأن الزمن يجري . هل يوجد قول أفصح من هذا القول ؟ ومع ذلك هل يوجد قول أكثر استعصاء على الادراك من هذا القول ؟ كيف يقدر الزمن على الحركة ؟ إن الزمن جزء من المكان ـ الزمان ، ففي أي وعاء يمكن أن يتحرك الزمن ؟ وماهي سرعة حركته ؟ يوماً بيوم !

إن الانطباع الكامن في نفوسنا عن زمن يتحرك ويجري ويمر ، عن زمن ذي نشاط وحيد الاتجاه ، هو شيء جوهري في كل خبرة نكتسبها من نشاطنا الحياتي كله (في الحضارة الغربية على الأقل) . وعلى هذا ترى المرء يبدي معارضة شديدة لكل فكرة تنفي مرور الزمن وتعتبره وهماً .

والزمن النفساني البشري يقع في عدة سويات بنوية تتجاوز الزمن السائد في الفيزياء . فالفيزياء تميز بين الماضي والمستقبل ، لكن العقل البشري يرى فيه ماضياً وحاضراً ومستقبلاً . إننا نتذكر الماضي ونخطط المستقبل ، لكننا نفعل «الآن» . إن الوقت الحاضر هو وقت تناولنا للعالم ـ اللحظة التي نستطيع فيها أن نحدث تغييراً فيه .

ولكن ماهو «الآن» ؟ لا يوجد شيء من هذا القبيل في الفيزياء ، حتى أننا لا نملك مايبعث على الظن بامكانية ايجاد توصيف لـ «الآن» بعبارات الفيزياء . لنحاول ذلك مثلاً بما يلي : إن «الآن» لحظة مفردة من الزمن . إن جواب «أي لحظة هو ؟» هو «كل لحظة» . إن كل لحظة من الزمن تصبح «الآن» عندما «تحين» . لكننا هنا ندور في حلقة مفرغة . إن العام ٢٠٠٠ يقع في المستقبل أثناء كتابة هذه السطور . وهو في يوم ما (٢٠٠١) سيقع في الماضي . فهو رغم أنه «الآن» المستقبلي سوف «يحين» عندما يكون «الآن» العام ٢٠٠٠ .

فالقـول بأن كل زمن هو «الآن» عندما يحين ، وبأن كل «الآنات» لاتحين في زمن واحد نفسه ، هو تكرار لمعنى واحد دون زيادة ولا نقصان . إنه بكل بساطة يصف زمنا وحيد البعد بأنه تسلسل من «الآنات» ، في مقام تسلسل من النقط : إنه تعديل لفظي تافه . وهكذا تبدو أفكارنا عن «الماضي» و «الحاضر» و «المستقبل» أقرب الى التدبير اللغوي منها الى المدلول الفيزيائي .

وإزاء هذا المأزق لا تستطيع الفيزياء أن تتقدم كثيراً في بحث كلمة الآن . لكن نظرية النسبية الخاصة تلقي بعض الضوء على هذا الموضوع . لنستذكر بهذا الصدد ماقلناه في الفقرة ٢ ـ ٢ من أن التزامن شيء نسبي . أي أنه لايوجد حاضر واحد شامل يعم كل نقاط الفضـاء . فالحوادث التي تقع مفصولة بمسافات مكانية لا يملك الضوء وقتاً لقطعها ، لايمكن وضعها في ترتيب زمني واحد بالنسبة لكل الراصدين مهما كانت الحالة الحركية لكل منهم . وعلى هذا فإن أحد خصائص «الآن» المعنوية ـ وهو أن يكون «الآن» نفسه آناً واحداً لدى كل الناس في كل مكان (أي أنني مثلاً أعلم الآن مايفعله الآن فلان وفلان) ـ هو تجاوز لا مسوغ له . فلا يوجد إذن آن شامل عالمي ، بل إن لكل شخص آنه ـ لكل شخص «هنا وآن» . وهذا مايوحي بشدة بأن العقل ، لا العالم الفيزيائي ، هو مصدر تقسيم الزمن الى ماض وحاضر ومستقبل .

مايزال علينا أن نعالج واقع أن «الآن» في انتباهنا الواعي يظهر متحركاً على الدوام من المـاضي الى المستقبـل . فهـذه الحـركة تبدو سبباً أكثر وجاهة ، من اللاتناظر الزمني والذاكرة والتنبؤ ، لنشوء التمييز المعنوي القوي بين الماضي والمستقبل . ولا أدل على ذلك من التعابير والصور الشائعة في اللغة مثل : الزمن «يطير» ، الأمور «تمضي» ، المرء «صائر الى قدره» . والكائن البشري يملك إحساساً قوياً بالمستقبل «الآتي» في حين أنه يرى أن الماضي قد «انقضى» وجوده . فلا وجود الا للحاضر . فهناك إذن نوع من التخلق المعنوي الدائم ـ عالم جديد في كل وقت . وتعطي الصلة بين العوالم المتوالية انطباعاً بـ «التحول الى» أو بـ «الاستمرار الى» الـ «تالي» .

لايحدث شيء من هذا في الفيزياء . فهي لم تشهد قط تجربة صيغت لكشف مرور الزمن . فبمجرد أن نضع العالم الموضوعي في منظار الواقع يختفي مرور الزمن كشبح في ليل مظلم .

لقد نشر دُن J.W.Dunn منذ بضع سنين كتباً غير عادية حول فكرة زمن مسلسل . وبالاعتماد على فكرة أن الزمن المتحرك يجب أن يقاس بزمن آخر كي يكتسب معنى ما (أي قياس سرعة حركته) يقترح دن سلاسل لا متنهية من الأبعاد الزمنية ، كل سلسلة تندفق بالنسبة للسلسلة التي تليها . ولدعم هذا الاقتراح الغريب يسوق المؤلف أمثلة عن تجارب تهدف الى معرفة المستقبل من خلال أحوال الأحلام . ورغم أن أفكار دن لم تلق قبولاً لدى الفيزيائيين ، إلا أنهم يبدون معترضين دوماً على إنكار حقيقة الحاضر المتحرك . وما دمنا غير قادرين على رفض ظاهرة «الآن المتحرك» فعلينا أن نقبل بأننا لا نفهم شيئاً عن الزمان أو العقل أو كليهما .

إن المستقبل كفيل بأن يكشف للمكان والزمان عن خواص تندرج في الصورة التي رسمناها للجنس البشري في هذا الكون وتفتح آفاقاً جديدة تماماً لادراك الصلات بين الجنس البشري والعقل والعالم .

أعمال الدكتور أدهم السمان المنشورة

في التأليف

الضوء الهندسي . منشورات جامعة دمشق ، ١٩٨٢
الكهرطيسية . منشورات جامعة دمشق ، ١٩٨٣

في الترجمة

الأرض والسماء . تأليف أ . فولكوف
منشورات وزارة الثقافة والإرشاد القومي ، دمشق ، ١٩٦٨
طبيعة قوانين الفيزياء . تأليف رتشارد فاينمان
منشورات دار الرسالة (طبعة ثانية) ، دمشق ، ١٩٨٥
فيزياء وفلسفة . تأليف فيرنر هايزنبرغ
طبعة ثانية مزيدة ومنقحة تحت الطبع ، في منشورات الشركة المتحدة للتوزيع
هكذا أرى العالم . تأليف ألبرت أينشتاين
منشورات وزارة الثقافة والإرشاد القومي ، دمشق ، ١٩٨٥
تطور الأفكار في الفيزياء . تأليف ألبرت أينشتاين وليوبولد إنفلد
منشورات وزارة الثقافة والإرشاد القومي ، دمشق ، ١٩٨٦
الطبيعة في الفيزياء المعاصرة . تأليف فيرنر هايزنبرغ
منشورات دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر ، دمشق ، ١٩٨٦